

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO
CONSIDERANDO REDES DE TRANSMISSÃO

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA
ELÉTRICA

JOÃO CARLOS MARTINS LÚCIO

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO/1990

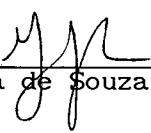
PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO
CONSIDERANDO REDES DE TRANSMISSÃO

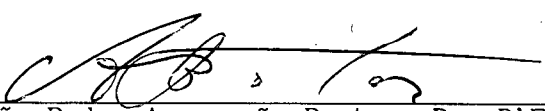
JOÃO CARLOS MARTINS LÚCIO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

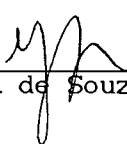
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA


ESPECIALIDADE ENGENHARIA ELÉTRICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO

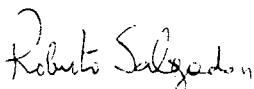

Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.
Orientador


Prof. João Pedro Assumpção Bastos, Dr. D'Etat
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, D.Sc.


Prof. Hans Helmut Zürn, Ph.D.


Prof. Roberto de Souza Salgado, Ph.D.


Prof. C. Celso de Brasil Camargo, M.Sc.

Aos meus pais
e irmãos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Luiz Gonzaga de Souza Fonseca, pela orientação, incentivo e amizade demonstrados ao longo de todo o trabalho.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, área de Sistemas de Potência, pelos conhecimentos transmitidos e contribuições para este trabalho.

Aos colegas de curso e aos funcionários do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, pelo companheirismo e apoio demonstrados.

Agradeço também à CAPES pelo apoio financeiro oferecido.

SUMÁRIO

RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	xi
 CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	 001
 CAPÍTULO II - EXPANSÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	 006
2.1 - Introdução.....	006
2.2 - Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos.....	006
2.2.1 - Objetivos e Características do Planejamento.....	006
2.2.2 - Previsão do Consumo de Energia Elétrica.....	007
2.2.3 - Expansão do Sistema de Geração.....	008
2.2.4 - Expansão do Sistema de Transmissão.....	009
2.3 - Planejamento da Expansão no Âmbito das Empresas do Setor Elétrico - Critérios e Procedimentos.....	010
2.3.1 - Despacho de Referência e Redespacho de Geração.....	010
2.3.2 - Critérios Para a Integração de Uma Usina ou Grupo de Usinas à Malha Principal.....	011
2.3.3 - Representação do Sistema de Geração na Análise de Segurança.....	011
2.4 - Metodologia Para o Planejamento Otimizado da Expansão dos Sistemas Elétricos.....	012
2.4.1 - Determinação de Caminho de Mínimo Custo Via Algoritmos de Busca em Grafo.....	013
2.4.2 - Descrição do problema de Busca em Grafo Aplicado ao Planejamento.....	013
2.4.3 - Definições Básicas.....	015
2.4.3.1 - Configuração de um Sistema.....	015
2.4.3.2 - Estratégia ou Política de Expansão de um Sistema...	015
2.4.3.3 - Custo de Uma Estratégia.....	015
2.4.3.4 - O Grafo de Expansão de um Sistema.....	016
2.4.3.5 - Expansão de Uma Configuração.....	017
2.4.4 - Enunciado do Problema de Busca em Grafo.....	017

2.4.5 - Algoritmo Para a Expansão dos Sistemas de Geração e Transmissão.....	018
2.4.6 - A Função Heurística $\hat{h}(n)$	023
2.5 - Conclusão.....	024

CAPÍTULO III - EXPANSÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO UTILIZANDO METODOLOGIA DE BUSCA EM GRAFO

025

3.1 - Introdução.....	025
3.2 - Características do Problema.....	025
3.3 - Transição de Estados dos Nós da Rede Básica e Custo de Transição.....	026
3.4 - Configuração do Sistema de Geração.....	027
3.5 - Viabilidade de Uma Configuração.....	028
3.6 - Enunciado do Problema da Expansão do Sistema de Geração Via Busca em Grafo.....	030
3.7 - Conclusão.....	030

CAPÍTULO IV - EXPANSÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO METODOLOGIA DE BUSCA EM GRAFO

032

4.1 - Introdução.....	032
4.2 - Características do Problema.....	032
4.3 - Transição de Estados dos Ramos da Rede Básica e Custo de Transição.....	033
4.4 - Configuração do Sistema de Transmissão.....	033
4.5 - Enunciado do Problema da Expansão do Sistema de Transmissão Via Busca em Grafo.....	034
4.6 - Viabilidade de Uma Configuração - Análise de Segurança.....	034
4.6.1 - Análise de Contingências.....	035
4.6.2 - Critério Estático de Segurança.....	037
4.6.3 - Critério Dinâmico de Segurança.....	038
4.6.3.1 - Modelo Matemático do Sistema.....	038

4.6.3.2 - Definição da Superfície Limite de Energia	
Potencial - SLEP.....	040
4.7 - Problema de Planejamento a Curto Prazo.....	044
4.7.1 - Cálculo do Critério de Eficiência.....	044
4.8 - Conclusão.....	046
 CAPÍTULO V - METODOLOGIA PROPOSTA PARA O PLANEJAMENTO INTEGRADO	
DE SISTEMAS ELÉTRICOS	048
5.1 - Introdução.....	048
5.2 - Metodologia Proposta.....	048
5.2.1 - Pré-Ordenação das Usinas Disponíveis e Obtenção do	
Conjunto de Usinas Viáveis.....	048
5.2.2 - Seqüência Inicial de Planos de Expansão da Geração.....	049
5.2.3 - Estabelecimento dos Despachos de Geração	052
5.2.4 - Limitante Inferior de Custo de Transmissão.....	052
5.3 - Dados Básicos do Sistema Elétrico.....	053
5.3.1 - Dados de Demanda de Energia Elétrica.....	053
5.3.2 - Dados do Parque Gerador.....	053
5.3.3 - Dados da Rede de Transmissão.....	054
5.3.4 - Dados de Custos de Construção e Montagem de	
Equipamentos.....	054
5.3.5 - Dados Gerais do Processo de Busca em Grafo.....	055
5.3.6 - Outros Dados de Interesse.....	056
5.4 - Algoritmo Para Determinação de Planos Integrados de	
Expansão.....	056
5.4.1 - O Algoritmo.....	057
5.4.2 - Desempenho do Algoritmo.....	058
5.5 - Conclusão.....	059
 CAPÍTULO VI - EXEMPLOS E RESULTADOS	060
6.1 - Introdução.....	060
6.2 - Exemplo 1 - Sistema de 17 Barras.....	061
6.2.1 - Planos de Expansão da Geração.....	064

RESUMO

Neste trabalho, apresenta-se uma proposta de metodologia para o Planejamento Integrado dos Sistemas Elétricos de Potência, explorando-se a interação existente entre os estudos de expansão dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica. Procura-se salientar a importância do Planejamento Integrado, no sentido de melhor se utilizar os recursos disponíveis no setor elétrico, reduzindo-se os custos relativos à expansão e operação do sistema.

Basicamente, apresenta-se um procedimento para a consideração explícita da rede de transmissão, na determinação de um cronograma de obras do parque gerador, supondo-se que a parcela de custo relativa à construção de linhas, seja de magnitude tal, que possa determinar uma alteração na sequência de construção de usinas geradoras, obtida inicialmente sem se considerar os custos para a integração das mesmas ao sistema, ou considerando estes custos de maneira estimada. Com isto, pode-se ter a antecipação de alguns investimentos e a postergação de outros, alterando-se os juros associados, resultando na diminuição dos custos globais de expansão.

A expansão dos sistemas de geração e transmissão é feita de maneira otimizada. Para isto, emprega-se a metodologia de determinação de caminho de mínimo custo via algoritmo de busca em grafo, obtendo-se como solução, cronogramas de obras de usinas e linhas, da maneira mais econômica possível, de acordo com a disponibilidade computacional existente.

Por fim, pode-se obter o melhor plano integrado de expansão, através de um algoritmo final, que gera uma lista de planos integrados a

partir da combinação dos algoritmos de expansão da geração e da transmissão. Estes planos são então confrontados em termos de custos globais, até que seja satisfeito um critério de convergência, que permita a obtenção de resultados satisfatórios.

ABSTRACT

This work presents the proposal of a methodology which, by exploring the interaction between generation and transmission systems expansion studies, aims for an Integrated Planning of Power Systems. It intends to emphasize the Integrated Planning importance so as to improve the utilization of the available resources in the electric sector and to reduce the expansion and operational costs.

The work describes a procedure to consider explicitly the network for the determination of a generation system construction schedule. It considers that the transmission lines construction costs have a significative weight so that it can modify the initial generation expansion plan with the anticipation of some investments and the postponement of others, decreasing the global expansion costs.

The generation and transmission systems expansion is made in an optimal way using a Graph Search Algorithm. Finally, the best Integrated Plan is obtained from a final algorithm that generates a sequence of integrated plans from combination of generation and transmission algorithms. These plans are compared from a global cost point of view until a convergence criterion has been satisfied.

CAPÍTULO I

1 - INTRODUÇÃO

A expansão dos sistemas elétricos, no sentido de se adaptar as capacidades instaladas dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica à evolução da demanda, sempre dentro de requisitos pré-estabelecidos de segurança, decorre do uso crescente da energia, função da própria evolução da sociedade.

Devido ao tempo gasto desde a concepção até a entrada em operação dos equipamentos de geração e transmissão, necessita-se que os estudos de planejamento da expansão sejam feitos a longo prazo, estabelecendo-se previsões para o consumo de energia em horizontes de até 20 anos. Define-se então, um programa de obras do parque gerador capaz de suprir este consumo, além do respectivo programa de obras da rede de transmissão, que garanta a entrega da energia gerada aos consumidores, satisfazendo a diversos critérios de confiabilidade e qualidade de atendimento.

É importante, que se procure obter políticas otimizadas de expansão, em vista dos altos custos associados à construção de usinas e linhas de transmissão. Ou seja, deve-se evitar o superdimensionamento e/ou ociosidade prematura dos equipamentos.

Devido em grande parte, à complexidade do problema de Planejamento Integrado, geração/transmissão, a expansão dos sistemas no âmbito das empresas do setor elétrico é feita, usualmente, de maneira desacoplada, isto é, não se considera explicitamente a expansão da rede de transmissão e

seus custos associados, quando da determinação do melhor cronograma de obras do parque gerador.

Para certos sistemas, é feita a consideração simplificada dos custos de transmissão relativos à integração de usinas, como percentagem dos custos de construção das mesmas.

Nestes casos, verifica-se que os investimentos em obras de geração, representam parcela majoritária dos custos globais de expansão. Com isto, supõe-se que a consideração explícita da transmissão não afetará a seqüência de construção de usinas.

Existem porém, algumas situações em que a interação entre as áreas de expansão da geração e transmissão, se torna necessária, na busca da otimização dos planos de expansão do sistema, como se pode observar a partir do exposto a seguir [8]:

1) Usinas Distantes da Malha Principal:

Nestes casos, o custo de integração da usina pode ser significativo frente ao seu custo de construção, o que pode alterar não só o programa de obras, como também a capacidade instalada dos equipamentos. Este fato se torna mais evidente quando se trata de integrar usinas de pequeno e médio porte, que apresentam uma maior sensibilidade aos custos do esquema de integração.

2) Linhas de Transmissão com Tendência à Ociosidade Futura:

Uma determinada linha de transmissão pode se apresentar inicialmente carregada e ter este carregamento diminuído em função da construção de novas usinas, mais próximas à região suprida por esta linha. Observa-se que a alteração na sequência de construção das usinas, o que poderá implicar na antecipação de geração mais cara, pode ser compensada pela não construção da linha com tendência à ociosidade.

3) Alocação de Reserva de Potência Considerando Requisitos de Confiabilidade:

A determinação da potência instalada e da alocação de usinas de Ponta é decidida a partir de um estudo probabilístico de desempenho do sistema gerador, sem levar em conta o sistema de transmissão. Para os casos em que se tenha, por exemplo, extensas linhas de transmissão, transportando grandes blocos de energia, torna-se relevante a consideração da transmissão no dimensionamento e localização da potência instalada das usinas, a fim de se obter resultados mais satisfatórios em termos de confiabilidade da operação do sistema.

As situações apresentadas acima, são características de sistemas predominantemente hidroelétricos, como o brasileiro. Para estes sistemas, o Planejamento Integrado pode resultar em economia, em função da obtenção de um plano de expansão que contemple a utilização racional dos equipamentos disponíveis.

Como parte do processo de expansão da transmissão, deve-se ainda considerar a Análise de Segurança do sistema, baseada na simulação de diversas contingências, com a observação dos carregamentos máximos dos ramos

da rede e da estabilidade dos geradores do sistema elétrico.

Assim como em [6,10], utiliza-se neste trabalho a Análise de Estabilidade Transitória, baseada no conceito da Superfície Limite de Energia Potencial - SLEP, combinada com a Análise Estática de carregamento dos ramos da rede, para se determinar a viabilidade de alternativas de reforço para o sistema de transmissão. Isto permitirá a obtenção de resultados menos conservativos que os obtidos em [2], que utiliza apenas a Análise Estática e em [3], que utiliza a Análise Estática e Dinâmica, porém baseada no método do Politopo.

Buscando-se o perfeito entendimento de todo o texto, adotou-se a seguinte divisão para o mesmo:

Primeiramente, procura-se apresentar o Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos, mostrando-se as suas várias etapas. Introduzem-se os critérios e procedimentos normais adotados no setor elétrico e o método de busca em grafos, bem como o algoritmo empregado na expansão otimizada dos sistemas de geração e transmissão.

Define-se então, a expansão do parque gerador e da rede de transmissão, como um problema de busca de caminho de mínimo custo via grafos de expansão, apresentando-se as características particulares de cada problema.

Dentro da expansão da transmissão, dá-se ênfase à Análise de Segurança, com os critérios estático e dinâmico, para o qual se define a Superfície Limite de Energia Potencial e se apresenta o processo de determinação da viabilidade de alternativas de reforço da rede.

Em seguida, apresenta-se a metodologia proposta para a obtenção do melhor plano integrado de expansão, juntamente com os dados básicos necessários e o algoritmo proposto, com os comentários a respeito do seu desempenho.

Ao final, são apresentadas as conclusões gerais, propostas para futuros trabalhos e as referências bibliográficas utilizadas.

Incluem-se ainda, apêndices que contêm as informações adicionais necessárias.

CAPÍTULO II

2 - EXPANSÃO DOS SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA

2.1 - Introdução

Neste capítulo descreve-se o Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos, definindo-se os objetivos a serem alcançados e as diversas etapas a serem cumpridas.

Apresentam-se os critérios e procedimentos adotados nas empresas do setor elétrico, destacando-se as interfaces existentes entre os estudos de expansão dos sistemas de geração e transmissão.

Mencionam-se também as diversas metodologias existentes na literatura, dando-se ênfase à determinação de caminho de mínimo custo via algoritmo de busca em grafo.

2.2 - Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos

2.2.1 - Objetivos e Características do Planejamento

O Planejamento da Expansão dos Sistemas Elétricos visa a determinação de programas de obras dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica, que atendam à evolução da demanda no tempo e minimizem os custos de expansão, observando-se ainda os critérios de desempenho estipulados [4,7].

O problema de planejamento apresenta grande complexidade em decorrência do significativo número de variáveis envolvidas, sendo algumas delas, de caráter aleatório. Deste tipo são as variáveis como a demanda, disponibilidade de geração de usinas e custos de construção e operação, que estão sujeitas à incertezas [7].

Em função destas características, decompõe-se o problema global de planejamento, em partes relacionadas aos aspectos temporais, aspectos espaciais e aspectos funcionais, envolvendo o tempo, áreas de interesse e funções respectivamente, como é mostrado no quadro 2.2.1, abaixo:

Quadro 2.2.1 - Decomposição do problema de planejamento.

NO TEMPO	NO ESPAÇO	POR FUNÇÃO
Longo Prazo	Nacional	Geração
Médio Prazo	Regional	Transmissão
Curto Prazo	Local	Distribuição

Trata-se aqui, do planejamento da expansão dos sistemas de geração e transmissão, a longo prazo, como sucessivas expansões a curto prazo, onde as metas a serem alcançadas devem contemplar as tendências da evolução da tecnologia e do consumo de energia, ou seja da própria sociedade.

2.2.2 - Previsão do Consumo de Energia Elétrica

A evolução do consumo de energia elétrica orienta o planejamento, determinando ao longo do período em estudo, as necessidades de expansão do sistema, bem como a capacidade instalada dos equipamentos. A previsão deste consumo constitui portanto, a primeira etapa rumo ao estabelecimento de programas de obras de geração e transmissão.

O consumo de energia elétrica em um país ou região, depende de variáveis relacionadas com aspectos sociais, políticos e econômicos. Assim, deve-se levar em conta a evolução dessas variáveis ao longo do tempo, para a determinação do mercado [4].

Neste trabalho, não se abordam os procedimentos usuais para a previsão de demanda, sendo a mesma considerada como um dado de entrada, em seus valores de Ponta (MW) e Energia (MWh), para cada estágio de planejamento.

2.2.3 - Expansão do Sistema de Geração

O passo inicial para o estabelecimento de um programa de obras de geração, consiste em se estimar os recursos naturais disponíveis, de modo a quantificar o potencial de geração na área de atuação do sistema. Deste estudo inicial, resultam informações que apontam os melhores locais para a alocação dos aproveitamentos hidroelétricos e das usinas térmicas, além do montante, de energia disponível [4,11].

Em um nível de estudos mais aprofundado, estabelece-se um conjunto de usinas geradoras disponíveis para a entrada em operação ao longo do período de planejamento, com as respectivas capacidades instaladas, Energias Firmes garantidas, número de unidades e custos estimados de construção e operação.

Partindo-se das informações obtidas, elaborase o plano de expansão do sistema de geração, utilizando-se um critério pré-estabelecido, usualmente de caráter econômico, mantendo-se a preocupação de garantir o suprimento da demanda com segurança e qualidade. O programa de expansão da

geração consiste então, no estabelecimento da melhor seqüência de construção de usinas, determinando-se o estágio dentro do período de planejamento, em que tais usinas devem entrar em operação.

Com o programa de obras estabelecido, determina-se o despacho básico de geração, em geral associado à demanda de Ponta prevista para o período. Este despacho, além de outras informações tais como, as capacidades instaladas e limites de geração das usinas, constantes de inércia e reatâncias das máquinas, constituem a interface entre os estudos de expansão dos sistemas de geração e transmissão.

2.2.4 - Expansão do Sistema de Transmissão

O planejamento da expansão do sistema de transmissão, parte de uma rede inicial, que contém todos os equipamentos existentes até o ano inicial do período de planejamento. As proposições de reforço, são feitas com base em uma rede viável, que contém, além das ligações já existentes, as ligações opcionais, referentes à inclusão de equipamentos ainda não existentes.

Busca-se o estabelecimento de um programa de obras de linhas de transmissão, de modo a permitir o escoamento, de maneira segura, de toda a energia gerada nas usinas, para o suprimento da demanda ao longo do tempo. Neste sentido, um plano de expansão da transmissão deve acompanhar, de maneira harmoniosa, a expansão do parque gerador, a fim de que todos os novos pontos de geração sejam convenientemente conectados ao sistema [4].

Como parte integrante dos estudos de planejamento da expansão

da transmissão, tem-se a Análise de Segurança da rede, que visa observar o comportamento do sistema, quando o mesmo é submetido a um conjunto de contingências, detectando-se as possíveis sobrecargas que apareçam. Torna-se portanto, imprescindível o estabelecimento de índices de desempenho e critérios para o estabelecimento das alternativas de reforço mais atraentes.

2.3 - Planejamento da Expansão no Âmbito das Empresas do Setor Elétrico

Critérios e Procedimentos [8,17]

2.3.1 - Despacho de Referência e Redespacho de Geração

O despacho de geração básico ou de referência, caracteriza o ponto de operação do sistema, no qual se baseia o estudo de Análise de Segurança da rede de transmissão. Este ponto operativo é tradicionalmente estabelecido em função de um despacho econômico, onde se busca a diminuição dos custos de geração.

Em sistemas predominantemente hidroelétricos, o despacho de geração deve ser associado ao montante de energia que pode ser produzida pelas usinas em um determinado período, correspondente às metas de geração energética.

Para estes sistemas, existe a possibilidade da diminuição dos custos relativos à expansão da rede, com a utilização de variação dos despachos de geração das usinas, sem que isto afete os custos de produção de energia. Propõe-se atualmente [8], a utilização do redespacho de geração, como forma de eliminar sobrecargas, possibilitando a postergação de investimentos

em obras de transmissão, levando-se em conta evidentemente as faixas de variação de geração admissíveis para cada usina.

2.3.2 - Critérios Para a Integração de Uma Usina ou Grupo de Usinas à Malha Principal.

Considera-se como critério básico para o dimensionamento da rede de integração, o funcionamento sem violação de nenhuma restrição de segurança, em condições normais de operação e despacho máximo em todas as máquinas da(s) usina(s). No caso de usina isolada, a redundância ou não dos circuitos de integração, vai depender de fatores como atendimento a critérios de confiabilidade, níveis de sobretensão, rejeição de carga e análise de estabilidade, entre outros.

2.3.3 - Representação do Sistema de Geração na Análise de Segurança

Em sistemas com diversidade hidrológica, torna-se conveniente a consideração de condições de hidraulicidade distintas, quando do estabelecimento do ponto de operação. Usualmente, contempla-se apenas a situação de hidraulicidade média, o que não garante o dimensionamento flexível dos equipamentos, o qual é necessário em função das freqüentes variações das afluências aos reservatórios das usinas. A consideração da diversidade hidrológica, permite ainda explicitar situações distintas de despacho térmico, para verificação do controle de tensão.

Em situações de contingências, permitem-se desvios temporários do despacho de geração, já que se está considerando distúrbios de curta duração e pouco freqüentes, e os desvios de geração podem ser compensados

quando do restabelecimento da operação normal do sistema. Quando não for possível o adiamento de obras via redespacho, propõem-se as alternativas de reforço, de acordo com o resultado da Análise de Segurança.

2.4 - Metodologia Para o Planejamento Otimizado da Expansão dos Sistemas Elétricos

Existem diversos métodos, propostos na literatura [7], que visam a obtenção da solução otimizada para o problema de planejamento dos sistemas elétricos. As vantagens da utilização de um ou outro método, dependem das características particulares do problema que se quer resolver.

Assim, os métodos de programação Linear e Não-Linear, se aplicam a problemas de otimização que apresentem funções objetivo e restrições lineares e não-lineares, respectivamente.

A Programação Dinâmica, é utilizada para o tratamento de problemas de decisão sequencial, onde a solução consiste na tomada de decisões ao longo de vários estágios de tempo. Existem ainda os métodos de Programação Estocástica Linear e Não-Linear, utilizados quando o problema apresentar variáveis aleatórias, com incertezas sobre seus valores futuros.

Em [7], apresentam-se as definições, em maiores detalhes, bem como as formulações dos métodos citados acima.

Apresenta-se em seguida, uma descrição e as definições relacionadas com o método utilizado neste trabalho, para a obtenção de soluções otimizadas para o problema de planejamento da expansão dos sistemas

elétricos [2,3,9,10].

2.4.1 - Determinação de Caminho de Mínimo Custo Via Algoritmos de Busca em Grafo

A resolução de problemas de decisão seqüencial por Programação Dinâmica, vem encontrando sérios problemas em termos computacionais, quando se estudam sistemas de grande porte. Para estes sistemas, existe a possibilidade de se utilizar técnicas eficientes de busca em grafo, no sentido de contornar as dificuldades encontradas [2].

O método de busca de caminho ótimo em grafos, usado neste trabalho, é aplicado a problemas de decisão seqüencial. O método consiste basicamente em se representar as alternativas de expansão do sistema através de um grafo, onde cada nó representa uma configuração do sistema elétrico em um estágio k e cada ramo representa o acréscimo de capacidade de geração ou transmissão, dependendo do problema em estudo, de um estágio k para o estágio $k+1$.

Determina-se então, o melhor caminho ou estratégia de evolução de uma configuração inicial, ao longo do período de planejamento, até uma configuração final.

2.4.2 - Descrição do Problema de Busca em Grafo Aplicado ao Planejamento

Existem sistemas que permitem a sua modelagem por uma rede finita, representada por um conjunto de nós e ramos. Assim, o planejamento de tais sistemas baseia-se nas características dos nós ou dos ramos da rede que

os modela.

Os sistemas de geração e transmissão de energia elétrica enquadram-se dentro do conjunto de sistemas comentados acima, considerando-se na sua modelagem, os nós como sendo pontos de geração e/ou carga e os ramos como sendo as interligações existentes entre estes pontos, ou seja, as linhas de transmissão e transformadores.

A solução do problema de busca em grafo, nos estudos de planejamento consiste em se obter a evolução de um sistema modelado por uma rede finita, a partir de uma configuração inicial, ao longo do tempo. Esta evolução se caracteriza pela modificação do estado de seus nós ou ramos, de modo a viabilizar a configuração inicialmente sobrecarregada.

Busca-se uma estratégia ótima de evolução, de maneira a satisfazer as condições de viabilidade a cada estágio de planejamento e ao mesmo tempo minimizar o custo total da estratégia.

Com as técnicas de busca em grafo, procura-se diretamente uma sequência de soluções sub-ótimas. O processo tenderá para a solução ótima, caso haja tempo computacional disponível ou, em caso de não disponibilidade, fornecerá uma solução sub-ótima, nunca pior que a solução sub-ótima anterior.

Antes de se formular matematicamente o processo de busca em grafo, apresentam-se algumas definições necessárias ao entendimento do problema.

2.4.3 - Definições Básicas [3]

2.4.3.1 - Configuração de Um Sistema

Uma configuração de um sistema, é uma tripla ordenada $\mathbb{C}(\mathcal{N}, \mathcal{M}, \mathcal{E})$, onde: $(\mathcal{N}, \mathcal{M})$ é a rede ou topologia que modela \mathbb{C} ;

\mathcal{N} é o conjunto de n nós da rede;

\mathcal{M} é o conjunto de m ramos da rede;

$\mathcal{E} \in \mathbb{R}^n$ ou $\mathcal{E} \in \mathbb{R}^m$ é um vetor de estado dos nós ou dos ramos da rede.

2.4.3.2 - Estratégia ou Política de Expansão de Um Sistema

É definida como uma seqüência de configurações:

$$\mathbb{E}(\mathbb{C}^0, \mathbb{C}^1, \dots, \mathbb{C}^f),$$

onde: \mathbb{C}^i é a configuração do sistema no estágio i ($i = 0, 1, 2, \dots, f$);

\mathbb{C}^{i+1} é uma configuração sucessora, obtida pelo reforço de algum dos elementos (nó ou ramo) da configuração \mathbb{C}^i .

2.4.3.3 - Custo de Uma Estratégia

O custo de uma estratégia \mathbb{E} , é dado por:

$$c(\mathbb{E}) = \sum_{i=1}^f c(\mathbb{C}^{i-1}, \mathbb{C}^i), \quad (2.4.1)$$

onde: $c(\mathbb{C}^{i-1}, \mathbb{C}^i)$ é o custo de transição da configuração \mathbb{C}^{i-1} para \mathbb{C}^i .

Este custo de transição é descontado para o estágio inicial de planejamento, ou qualquer outra referência, através da taxa de desconto β .

Assim, seja a transição $(\mathbb{C}^{i-1}, \mathbb{C}^i)$, correspondente ao estágio t_i do período $(t_0, t_1, \dots, t_i, \dots, t_f)$, o seu custo descontado, será dado por:

$$c_t(\mathbb{C}^{i-1}, \mathbb{C}^i) = c_{t_0} \cdot e^{-\beta(t_i - t_0)}, \quad (2.4.2)$$

onde: c_{t_0} é o custo da transição a preços de t_0 .

Utilizando-se 2.4.1, pode-se então obter o custo de uma configuração \mathbb{C}^k , no estágio k , da seguinte maneira:

$$c(\mathbb{C}^k) = \sum_{i=1}^k c(\mathbb{C}^{i-1}, \mathbb{C}^i) \quad (2.4.3)$$

2.4.3.4 - O Grafo de Expansão de Um Sistema

O grafo de expansão de um sistema, é um grafo simples e finito H , cujos nós são configurações do sistema em estudo, sendo que qualquer conjunto de transições a partir de uma configuração \mathbb{C} constitui um caminho em H . Define-se este grafo por uma configuração inicial \mathbb{C}^0 e por seu operador $\Lambda(\mathbb{C}^0)$, que gera os sucessores de \mathbb{C}^0 , sendo:

$$\Lambda(\mathbb{C}^0) = U \left[\Gamma^i(\mathbb{C}^0), i=1, 2, \dots \right],$$

onde: $\Gamma^i(\mathbb{C}^0)$ é o conjunto de sucessores de \mathbb{C}^0 , no estágio i ;

$U [\]$ é a união de todos os conjuntos $\Gamma^i(\mathbb{C}^0)$.

2.4.3.5 - Expansão de Uma Configuração

A expansão de uma configuração \mathbb{C} é definida como o processo de geração do conjunto de suas configurações sucessoras. Isto é, deseja-se encontrar as configurações possíveis de serem obtidas a partir de \mathbb{C} , via operador $\Lambda(\mathbb{C})$.

2.4.4 - Enunciado do Problema de Busca em Grafo

O problema de busca de caminho de mínimo custo utilizando grafo de expansão, pode ser enunciado como segue [2,3,10]:

Dados inicialmente:

- * N - o conjunto de nós de H ;
- * M - o conjunto de ramos de H ;
- * Uma função $c: M \rightarrow \mathbb{R}$, que associa a cada ramo $r = (n_1, n_2)$, o custo $c(r) = c(n_1, n_2)$, sendo n_1 e n_2 , nós do grafo de expansão, correspondentes respectivamente às configurações \mathbb{C}^1 e \mathbb{C}^2 ;
- * Um nó inicial $n_0 \in N$ e um conjunto $T \subset N$, denominado conjunto alvo;

Determinar, entre todos os caminhos possíveis de n_0 para T , aquele que apresenta o menor custo, obtendo-se a estratégia ótima E^* .

2.4.5 - Algoritmo Para a Expansão dos Sistemas de Geração e Transmissão

Apresenta-se aqui, o algoritmo empregado na expansão dos sistemas de geração e transmissão e suas principais características.

Tal algoritmo, foi proposto originalmente em [2]. Em [3] e [9], foi modificado para inclusão de novas heurísticas e para a consideração da Análise de Estabilidade Transitória, no conjunto de restrições associadas à análise de desempenho elétrico do sistema.

Tem-se como base, o algoritmo A^* [2,3,9,10] e procura-se fornecer a melhor solução encontrada durante um processo iterativo, obtendo-se a solução ótima, se o número de iterações for suficiente para tal.

A cada iteração, resolve-se o problema de busca em grafo, considerando-se na j -ésima iteração, um número máximo de j configurações sucessoras (alternativas de reforço). A solução obtida na iteração j , é utilizada como parâmetro para a obtenção da solução na iteração $j+1$.

O processo de busca pode ser interrompido, antes que se atinja o limite de iterações, se para uma iteração j :

$$C_{j-1} - C_j < \epsilon$$

onde: C_j é o custo da solução obtida na iteração j ;

ϵ é uma precisão especificada na entrada de dados.

Pelo que foi exposto na subseção 2.4.4, define-se:

$h(n_1, n_2)$ - custo de um caminho ótimo entre $n_1 \in N$ e $n_2 \in N$.

$$h(n_1) \triangleq h(n_1, T)$$

$g(n_1) \triangleq h(n_0, n_1)$ - Custo de um caminho ótimo de n_0 para n_1 .

Assim, o problema de busca consiste em encontrar um caminho E^* , tal que: $c(E^*) = h(n_0)$.

Os custos definidos acima, são considerados de maneira estimada. Assim, associada a cada configuração gerada, tem-se o custo $\hat{g}(n)$, ao qual é adicionado uma parcela heurística $\hat{h}(n)$, que fornece uma informação a respeito do custo para se chegar a T , partindo de n .

A soma dessas duas parcelas, resulta na função $\hat{f}(n) = \hat{g}(n) + \hat{h}(n)$, que representa uma estimativa do custo mínimo de um caminho de n_0 para T , passando por n .

Através da utilização de Podas e critérios de parada, o algoritmo fornece uma solução, que pode ser a ótima, dependendo do tempo disponível para a expansão e do número máximo de iterações estabelecido. As Podas são estratégias para a eliminação de nós não interessantes ao problema, evitando-se assim que os mesmos gerem sucessores, os quais seriam também não interessantes. Tais podas são apresentadas a seguir:

1) Poda 1

Considerando-se os nós de H , n e n' , que representam respectivamente as configurações C e C' . Se essas duas configurações

correspondem à instalação dos mesmos equipamentos, independentemente da ordem em que os mesmos são instalados, tendo portanto a mesma capacidade, o algoritmo eliminará, através da Poda 1, aquela de maior custo, ficando a mais barata, sujeita a uma eventual expansão.

2) Poda 2

Considerando-se um nó sucessor $n \in \Gamma(\bar{n})$, este nó será eliminado se: $\hat{g}(n) \geq c(n_0, T)_{k-1}$.

Onde: $c(n_0, T)_{k-1}$ é o custo da solução sub-ótima anterior.

3) Poda 2 com Acelerador

Consiste na utilização de um coeficiente Q , entre 0 e 1, que multiplica o custo $c(n_0, T)_{k-1}$. Isto faz com que se encontre mais rapidamente uma solução.

Neste caso, diz-se que o custo da solução ótima estará no intervalo $\left[Q \times c(n_0, T)_{k-1} ; c(n_0, T)_{k-1} \right]$ [9].

O algoritmo de busca em grafo, aplicado ao problema de expansão do sistema, manipula três listas. A primeira delas é denominada Lista Aberta e é composta pelos nós disponíveis para a expansão, uma segunda é denominada Lista Fechada, composta por nós extraídos da Lista Aberta para serem expandidos e uma terceira lista de Apontadores, que indicam a configuração antecessora daquelas pertencentes às duas primeiras listas.

Apresentam-se a seguir, os passos do algoritmo:

Passo 0: Definir número máximo de iterações - q .

Inicializar um contador de iterações, fazendo $k = 0$.

Passo 1: Se k for igual ao número máximo de iterações, parar considerando como solução ótima, a obtida na última iteração.

Senão: Fazer $k = k + 1$.

Gerar o nó inicial n_0 .

Introduzir n_0 na Lista Aberta e calcular $\hat{f}(n_0)$.

Passo 2: Se a Lista Aberta estiver vazia:

* $k = 1$, parar com insucesso.

* $k \neq 1$, voltar ao passo 1.

Senão, Lista Aberta contém elementos:

* Ir ao passo 3.

Passo 3: Retirar da Lista Aberta o nó n tal que:

$\hat{f}(n) = \text{Min} \{ \hat{f}(n) \mid n \in \text{Lista Aberta} \}$, denominando-o \bar{n} (resolver empates arbitrariamente, mas dando preferência a nós $n \in T$).

Introduzir \bar{n} na Lista Fechada.

Passo 4: Se $\bar{n} \in T$, voltar ao passo 1, obtendo o caminho ótimo para a iteração k , por meio dos apontadores.

Senão, ir ao passo 5.

Passo 5: Expandir \bar{n} , gerando no máximo k sucessores, previamente ordenados pelo custo $\hat{g}(n)$.

Para cada sucessor n , calcular $\hat{f}(n)$, sendo:

$$\hat{f}(n) = \hat{g}(n) + \hat{h}(n).$$

Submeter cada sucessor n às podas 1 e 2.

Se $\Gamma(\bar{n}) = 0$, voltar ao passo 2.

Passo 6: Associar aos sucessores que ainda não se encontram nas listas Aberta ou Fechada, os valores de \hat{f} calculados.

Introduzir estes nós na Lista Aberta e dirigir apontadores para \bar{n} .

Voltar ao passo 2.

Na primeira iteração, o algoritmo é idêntico ao da Estratégia Incremental, descrito em [3] e [9]. Por outro lado, se o número de iterações for igual ao número máximo de sucessores admitidos, reproduz-se o algoritmo A^* .

Como um passo adicional, a Poda 1 pode ser aplicada também, aos elementos da Lista Aberta, quando apresentarem custos superiores aos custos de um sucessor, que represente a instalação dos mesmos equipamentos.

Este algoritmo é admissível, isto é, fornece a solução ótima em um tempo finito, se o grafo H for finito e não possuir caminhos de custo negativo e ainda, se a Poda 2 for utilizada sem acelerador. As duas primeiras condições são plenamente satisfeitas, considerando-se que para a expansão dos sistemas elétricos, o número de estágios e de sucessores gerados a cada nível do grafo é finito e os custos de transição correspondem a custos de construção de usinas geradoras, linhas de transmissão e transformadores, sempre positivos.

Para o término do algoritmo acima, adotam-se os seguintes

critérios de parada:

1) Se após m iterações, sendo $m < q$, definido na entrada de dados, o algoritmo não encontrar uma solução melhor que a última encontrada, interrompe-se o processo de busca, obtendo-se uma solução sub-ótima.

2) Se o critério anterior não for satisfeito, então o algoritmo pára quando se atingir o número máximo q de iterações, ficando a admissibilidade dependente do valor de q . Se q for suficientemente grande de modo a se expandir todas as configurações possíveis, tem-se a solução ótima.

2.4.6 - A Função Heurística $\hat{h}(n)$

Com a utilização da parcela heurística $\hat{h}(n)$, levam-se em conta informações adicionais a respeito de cada problema particular. Esta função está diretamente relacionada com a eficiência do algoritmo pois, somente definindo-a adequadamente, pode-se garantir que uma determinada solução atenda a demanda ao longo de todo o horizonte de planejamento e que seja a solução ótima entre todas as soluções possíveis [2].

O algoritmo apresentado, explora a relação existente entre $\hat{h}(n)$ e a eficiência na obtenção de soluções, de modo que soluções sub-ótimas sejam encontradas com pouco esforço computacional.

A viabilidade de uma solução pode ser observada com base nas seguintes condições para $\hat{h}(n)$:

- 1) $\forall n \in N, \hat{h}(n) \leq h(n)$.

$$2) \forall n \in \mathbb{T}, \hat{h}(n) = 0.$$

Para a expansão dos sistemas elétricos, estabeleceu-se $\hat{h}(n)$ em função da máxima demanda atendida pela configuração, como segue [10]:

$$\hat{h}(n) = \frac{D^f - D^{\max}(n)}{D^f - D^0} \quad (2.4.4)$$

Onde: D^0 é a demanda prevista no ano inicial (MW);

D^f é a demanda prevista no ano horizonte (MW);

$D^{\max}(n)$ é a máxima demanda atendida pela configuração C (MW), representada no grafo pelo nó n .

2.5 - Conclusão

Com o que foi exposto nos itens anteriores, reforça-se a idéia da redução dos investimentos realizados para a expansão dos sistemas elétricos, a partir do Planejamento Integrado. Tal procedimento torna-se mais atraente para sistemas como o brasileiro, com características que elevam a significância do sistema de transmissão, tanto no que diz respeito à sua parcela no montante global de investimentos em expansão, quanto na operação confiável e atendimento aos critérios de segurança.

A metodologia de busca em grafo é usada como uma ferramenta na otimização da solução do problema de expansão, por apresentar formulação relativamente simples, além de oferecer a vantagem, frente a outros métodos existentes, de permitir a obtenção de soluções sub-ótimas satisfatórias, com baixo custo computacional. Isto torna adequada a sua aplicação à expansão de sistemas de grande porte.

CAPÍTULO III

3 - EXPANSÃO DO SISTEMA DE GERAÇÃO UTILIZANDO METODOLOGIA DE BUSCA EM GRAFO

3.1 - Introdução

Após ter sido apresentada a metodologia a ser empregada para a expansão otimizada dos sistemas elétricos, passa-se a uma abordagem mais específica do problema, onde se procura destacar as características peculiares à expansão dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica.

Inicia-se esta abordagem pelo sistema de geração, apresentando-se os procedimentos necessários para a obtenção de cronogramas de obras de usinas e particularizando-se as definições vistas no capítulo anterior, à este problema.

3.2 - Características do Problema

O processo de busca baseia-se nas características dos nós da rede finita que modela o sistema. Por isto, define-se um conjunto de nós básicos $\bar{N} = \bar{n}_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), correspondente a todos os pontos de geração e carga existentes e previstos, no sentido de orientar a expansão.

Inicialmente, no problema da expansão do sistema de geração, não se considera a rede de transmissão durante o processo de busca. Assim, o conjunto de ramos da rede finita e seus respectivos parâmetros, não são levados em conta, em princípio.

Define-se o conjunto $\bar{\eta}_i \subset R$, para cada nó básico \bar{n}_i ,

correspondente a um ponto de geração, como sendo o conjunto de estados admissíveis para o nó \bar{n}_i . Ainda, para cada estado admissível $v \in \bar{\eta}_i$, associa-se a capacidade $\rho_i(v)$, definida abaixo:

$$\rho_i(v) = \sum_{h=1}^p P_{g_h} \quad (3.2.1)$$

Onde: P_{g_h} é a potência de geração de cada unidade do nó \bar{n}_i .

p é o número de unidades geradoras conectadas ao nó \bar{n}_i , no estado v .

O estado v de um nó, é então caracterizado pelo número de unidades da usina a ele conectada, que se encontram em operação. Atinge-se a capacidade máxima de um nó quando $p = p_{\max}$, onde p_{\max} é o número total de unidades da usina.

A expansão do parque gerador será então determinada, em função da evolução do estado, isto é, da capacidade dos nós correspondentes a pontos de geração.

3.3 - Transição de Estados dos Nós da Rede Básica e Custo de Transição

Para a expansão da geração, a transição de estado dos nós corresponde à construção de usinas geradoras, levando-se em conta que as unidades de uma usina devem entrar em operação de acordo com as necessidades de suprimento de demanda ao longo do período de planejamento. Considera-se também, que uma vez iniciada a operação de uma usina, todas as suas unidades devem ser instaladas e entrar em operação sucessivamente, antes que se inicie a operação de outra usina, o que equivale a dizer que, uma vez iniciada a transição de estados em um nó, esta não deve ser interrompida até que se

atinja a sua capacidade máxima.

Os custos associados à uma transição de estado do nó \bar{n}_i , correspondem ao montante de investimentos realizados no sentido de aumentar a capacidade deste nó, através da construção e montagem das unidades da usina a ele conectada.

3.4 - Configuração do Sistema de Geração

Uma configuração do sistema de geração, em um certo nível do grafo de expansão, definido na subseção 2.4.3.4, é caracterizada por um conjunto de estados dos nós básicos, correspondentes a pontos de geração, até este nível. Assim, para uma dada configuração C , tem-se um conjunto v_i ($i=1,2,\dots,n_g$), definido na seção 3.2, onde n_g é o número de nós de geração.

A cada configuração associa-se a capacidade de geração, em termos de Potência Instalada e Energia Firme garantida e a máxima demanda atendida, o que caracteriza o seu limite de viabilidade, além do custo $g(C)$, definido na subseção 2.4.3.3.

Pelo que foi exposto nos itens anteriores, observa-se que a transição de uma configuração C^i do sistema de geração, para a configuração C^{i+1} , é resultado de uma sequência de transições de estado em um determinado nó da rede básica, desde a montagem da primeira unidade da usina correspondente, até se atingir o seu estado final, correspondente à capacidade máxima de geração da usina.

Assim, a evolução do estado de cada nó, gera uma configuração

sucessora de C^i , sendo o número de sucessoras, limitado pelo número de nós para os quais a transição de estados ainda não foi iniciada, dentro do caminho em expansão.

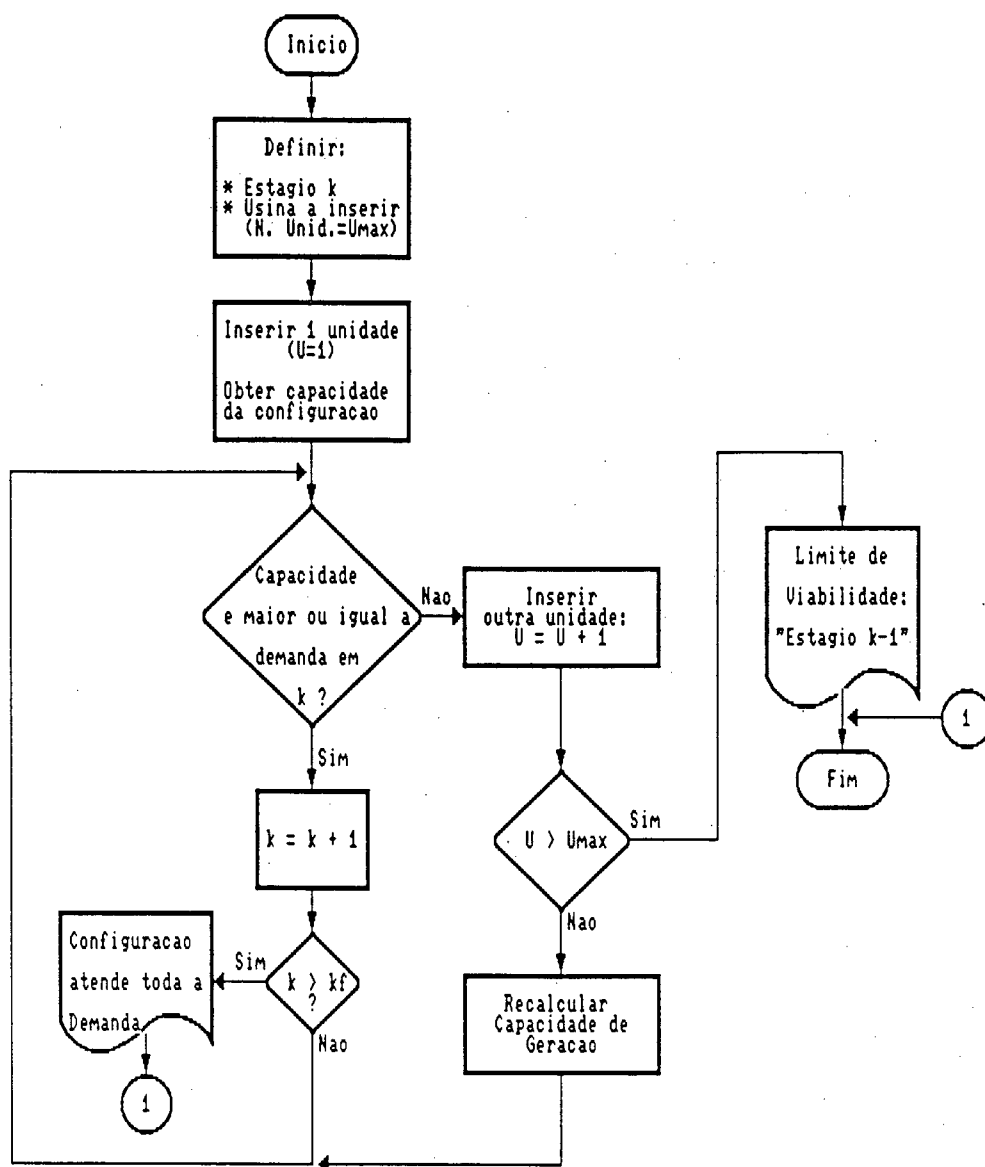
3.5 - Viabilidade de Uma Configuração

As condições de viabilidade são definidas em função da capacidade de geração dos nós.

Uma configuração do sistema de geração é considerada viável no estágio k , se o somatório das capacidades de geração dos nós que a caracterizam, for suficiente para o suprimento dos requisitos de demanda, mais uma reserva de geração. A partir disto, define-se o limite de viabilidade de uma configuração como sendo o último estágio em que se verifica a condição de viabilidade descrita acima.

A determinação do limite de viabilidade de uma configuração, confrontando-se a cada estágio de planejamento sua capacidade de geração com os requisitos de demanda, estabelece as necessidades de expansão do parque gerador, pela inclusão de novas usinas ao sistema.

Apresenta-se na figura 3.5.1, o processo de obtenção do limite de viabilidade de uma configuração.



kf - Estagio Final de Planejamento.

Figura 3.5.1 - Fluxograma simplificado para determinação do limite de viabilidade de uma configuração do sistema de geração.

3.6 - Enunciado do Problema da Expansão do Sistema de Geração Via Busca em Grafo

O problema da expansão do sistema de geração pode agora, ser enunciado da seguinte forma:

Dada uma configuração inicial, constituída pelas usinas em operação no ano inicial de planejamento, que deve ser viabilizada através da evolução do estado dos nós básicos, definidos o período e os estágios de planejamento, até o ano horizonte, um elenco de usinas geradoras disponíveis para entrar em operação até este horizonte, estabelecer o melhor cronograma de construção de usinas, do ponto de vista econômico, que atenda aos requisitos de demanda de Ponta e Energia, mais reserva de geração, ao longo do período de planejamento.

O melhor cronograma de expansão, corresponde a uma seqüência ótima de evolução do estado dos nós. Neste cronograma deve constar o estágio em que entram em operação as unidades de cada usina, obedecendo-se à seqüência ótima de construção obtida pelo algoritmo de busca em grafo.

3.7 - Conclusão

Mostrou-se neste capítulo, as principais características do problema da expansão do parque gerador via busca em grafo. A modelagem do sistema é bastante simples, trabalhando-se basicamente com os nós onde estão conectadas usinas geradoras.

O grafo de expansão assume dimensões reduzidas pois, os nós de

geração de um sistema, responsáveis pelo surgimento das diversas configurações, se apresentam em número não muito grande (da ordem de 200 para o sistema brasileiro). Além disso, para um dado horizonte, é usual determinar-se apenas um subconjunto destes nós.

As grandezas associadas a cada configuração, são de fácil quantificação, assim como a observação do atendimento ou não ao critério de viabilidade. Isto simplifica o processo de determinação do limite de viabilidade de uma configuração, fato que repercute no desempenho do algoritmo de expansão.

No capítulo seguinte, é apresentado o problema da expansão do sistema de transmissão e, mais adiante, o problema da expansão do sistema de forma integrada.

CAPÍTULO IV

4 - EXPANSÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO UTILIZANDO METODOLOGIA DE BUSCA EM GRAFO

4.1 - Introdução

Neste capítulo, apresentam-se as definições e características básicas relativas ao problema da expansão da transmissão e aborda-se o estudo de Análise de Segurança da rede, como uma etapa integrante do processo global de expansão.

Trata-se da Análise de Estabilidade Transitória, proposta em [3] e [10], combinada com a Análise Estática, na determinação do limite de viabilidade de uma configuração.

4.2 - Características do Problema

A expansão do sistema de transmissão, é feita em função das características dos ramos da rede que modela o sistema. Define-se assim, uma rede básica (\bar{N}, \bar{M}) , formada pelo conjunto de nós básicos \bar{N} , visto na seção 3.2 e pelo conjunto de ramos básicos $\bar{M} = \bar{r}_i$ ($i=1,2,\dots,m$), para os quais são atribuídos o conjunto $\bar{\sigma}_i$ de estados admissíveis e a capacidade de transmissão $\gamma_i(\kappa)$, para $\kappa \in \bar{\sigma}_i$, definida abaixo [2]:

$$\gamma_i(\kappa) = \sum_{h=1}^p \frac{|V_{ih}|^2 \cdot X_{ih}}{|Z_{ih}|^2} \quad (4.2.1)$$

Onde: V_{ih} é a tensão nominal da h-ésima linha do ramo \bar{n}_i .

$Z_{ih} = R_{ih} + jX_{ih}$ é a impedância da h-ésima linha do ramo \bar{n}_i .

p é o número de linhas que constituem o ramo \bar{n}_i , no estado κ .

Para a evolução do estado dos ramos da rede, consideram-se como parâmetros dos nós, a injeção líquida de potência ativa, para os nós correspondentes a pontos de geração e carga. Além destes parâmetros, devem ser fornecidos o número de máquinas conectadas, suas inércias e reatâncias transitórias, para os nós de geração.

4.3 - Transição de Estados dos Ramos da Rede Básica e Custo de Transição

Considera-se como transição de estado dos ramos, a construção de linhas de transmissão, como forma de aliviar sobrecargas. O critério utilizado para gerar as alternativas de reforço é o mesmo proposto em [10] e consiste em se reforçar os ramos que se apresentem sobrecarregados, além dos ramos cuja saída de operação causou as sobrecargas. Assim, o número de configurações sucessoras para expandir uma configuração do sistema de transmissão, é limitado pelo conjunto das linhas para as quais se verificou problemas de sobrecarga e estabilidade.

Os custos de transição de estado do ramo $\bar{n}_i = (\bar{n}_j, \bar{n}_k)$, referem-se ao custo de construção de uma linha entre \bar{n}_j e \bar{n}_k , calculados a partir do custo por Km, podendo-se considerar também o custo das instalações terminais.

4.4 - Configuração do Sistema de Transmissão

O modelo da rede de transmissão é definido por nós e ramos, de tal modo que uma configuração para este sistema, caracteriza-se por um conjunto de estados dos ramos da rede básica, por um conjunto de estados dos nós de geração da rede básica e pelo mercado correspondente a esses nós e aos demais.

De maneira análoga ao que é feito para a expansão da geração, associa-se à configuração do sistema de transmissão, a capacidade de transmissão de potência, a máxima demanda que pode ser atendida, o limite de viabilidade e o custo de transição $g(C)$.

4.5 - Enunciado do Problema da Expansão do Sistema de Transmissão Via Busca em Grafo

Dada uma configuração inicial, os parâmetros dos nós, os critérios de segurança a serem atendidos e o período de planejamento, busca-se a melhor estratégia de construção de linhas de transmissão, em termos de custo, sendo conhecidos os parâmetros dos nós a cada estágio de planejamento e obedecendo-se às condições de viabilidade.

4.6 - Viabilidade de Uma Configuração - Análise de Segurança

Uma configuração do sistema de transmissão é dita viável no estágio k , se todos os seus ramos operam dentro dos limites de carregamento durante a operação normal do sistema ou, em caso de retirada de linha ou transformador ou curto-circuito com chaveamento de uma linha, em qualquer ramo, verifica-se ainda a operação dentro dos limites e a não existência de problemas de estabilidade que causem a perda de sincronismo entre geradores.

Verifica-se a necessidade de um processo de Análise de Contingências, no estudo de viabilidade de uma configuração, o que torna este procedimento mais complexo em relação ao visto em 3.5 para o sistema de geração.

4.6.1 - Análise de Contingências

O processo é o mesmo adotado em [10], onde considera-se dois tipos de contingência:

- Saída de operação de linha ou transformador;
- Curto-circuito trifásico com retirada da linha para eliminação do defeito, após um tempo correspondente ao tempo de abertura dos disjuntores.

Inicia-se o estudo de viabilidade de uma configuração, pela determinação dos fluxos de potência ativa nos ramos da rede, para a situação pré-defeito, a partir dos ângulos de barra, via fluxo de potência DC. A utilização do fluxo DC se torna adequada face ao grande número de contingências a ser analisado, permitindo rapidez de cálculo.

Para o cálculo dos ângulos pré-falta, resolve-se o seguinte sistema de equações lineares:

$$P = -B \cdot \theta, \quad (4.6.1)$$

onde: B é a matriz susceptância da matriz Y_{barra} ;

P é o vetor de injeções líquidas nas barras;

θ é o vetor dos ângulos de barra.

Os ângulos pós-falta são obtidos pelo Método da Compensação [1]. Assim, supondo-se a retirada de uma linha entre as barras p e q, produzindo-se uma variação de capacidade $\Delta\gamma = 1/x$, onde x é a reatância da linha, tem-se a seguinte variação dos ângulos de barra:

$$\Delta\theta = \alpha(B_p^{-1} - B_q^{-1})\phi_{pq}, \quad (4.6.2)$$

$$\alpha = \frac{-\Delta\gamma}{1 + \Delta\gamma \left(B_{pp}^{-1} + B_{qq}^{-1} - 2B_{pq}^{-1} \right)}, \quad (4.6.3)$$

onde: B_p^{-1} é a p-ésima coluna de B^{-1} ;

B_{pq}^{-1} é o elemento da linha p e coluna q de B^{-1} ;

ϕ_{pq} é a defasagem no ramo p-q, antes da falta;

$B_{rj}^{-1} = B_{jr}^{-1} = 0$ (r = referência).

Passa-se à descrição dos critérios estático e dinâmico que constituem o processo de Análise de Segurança, baseado na simulação de contingências.

4.6.2 - Critério Estático de Segurança [2]

A análise do critério estático de segurança, consiste na observação da existência de fluxos excessivos nos ramos da rede, com base nas

defasagens angulares entre barras.

Estabelecem-se dois limites para esta defasagem. O primeiro corresponde ao limite térmico e/ou queda de tensão máxima permitida em cada linha do ramo e o segundo corresponde à máxima defasagem ϕ_{\max} , permitida em cada linha de modo a preservar a estabilidade do sistema em situações de emergência, sendo este valor fixado, usualmente, em 36° . Nos casos em que se considera apenas o critério estático na Análise de Segurança, a defasagem ϕ_i no ramo \bar{r}_i , não deve ultrapassar, em nenhuma situação de emergência, o valor mínimo entre esses dois limites.

Neste trabalho, utiliza-se o valor ϕ_{\max} como um seletor de casos críticos a serem analisados do ponto de vista dinâmico.

Define-se então, para cada configuração:

1) $\bar{\phi}(\mathbb{C}) \in \mathbb{R}^m$, $\bar{\phi}(\mathbb{C}) > 0$ - Vetor de limites de defasagens nos ramos.

2) $\hat{\phi}(\mathbb{C}) \in \mathbb{R}^m$ - Vetor de defasagens máximas nos ramos, após análise de contingências. Para cada ramo \bar{r}_i , tem-se:

$$\hat{\phi}_i(\mathbb{C}) = \phi_i^q(\mathbb{C}), \quad (i = 1, 2, \dots, \bar{m}),$$

onde: $|\phi_i^q(\mathbb{C})| = \text{Máx } |\phi_i^p(\mathbb{C})|$, ($p = 1, 2, \dots, m'$), sendo m' o número de contingências analisadas.

Com isto, uma configuração será segura se:

$$|\hat{\phi}_i(\mathbb{C})| \leq \bar{\phi}_i(\mathbb{C}), \quad \text{para } i = 1, 2, \dots, \bar{m}.$$

Para efeito de detecção das faltas que provocam sobrecarga na rede e registro destas sobrecargas, a verificação do critério de segurança deve ser feita a cada contingência.

4.6.3 - Critério Dinâmico de Segurança [10]

A observação do comportamento dinâmico do sistema, frente à ocorrência de diversos distúrbios, consiste na Análise de Estabilidade Transitória do estado de equilíbrio (ângulos de barra) pós-falta.

Esta análise baseia-se no conceito da Superfície Limite de Energia Potencial, pelos motivos já comentados no capítulo 1. A SLEP é então definida como em [6] e [10], mostrando-se a sua utilização no planejamento da transmissão.

4.6.3.1 - Modelo Matemático do Sistema

Utiliza-se o modelo clássico para a representação da máquina síncrona, levando-se em conta as simplificações usuais, baseadas nas hipóteses consideradas em [6].

Pode-se escrever a equação de oscilação para cada máquina como sendo:

$$M_i \frac{d^2 \delta_i}{dt^2} + d_i \frac{d \delta_i}{dt} = P_{m_i} - P_{g_i}, \text{ para } i = 1, 2, \dots, n_g, \quad (4.6.4)$$

onde: t é o tempo em segundos;

δ é o ângulo entre o eixo do rotor do i -ésimo gerador e uma referência

girando à velocidade síncrona (radianos);

M_i é a Constante de Inércia do i -ésimo gerador (seg./rad. elétricos);

d_i é o Coeficiente de Amortecimento de entrada para o i -ésimo gerador (seg./rad. elétricos);

P_{m_i} é a potência mecânica de entrada para o i -ésimo gerador (p.u.);

P_{g_i} é a potência elétrica injetada na i -ésima barra pelo i -ésimo gerador (p.u.).

Utilizando-se a referência Centro de Ângulo [6,10], tem-se:

$$\delta_0 = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^{n_g} M_i \cdot \delta_i \quad (4.6.5)$$

$$M_T \ddot{\delta}_0 = -d_T \dot{\delta}_0 - \sum_{i=1}^{n_g} d_i \dot{\theta}_i + P_c, \quad (4.6.6)$$

$$\text{onde: } M_T = \sum_{i=1}^{n_g} M_i$$

Assim, o movimento dos rotores dos geradores é representado pela seguinte equação diferencial:

$$\begin{aligned} M_i \ddot{\theta}_i = & - \left[d_i \dot{\theta}_i - \frac{M_i}{M_T} \sum_{i=1}^{n_g} d_i \dot{\theta}_i \right] - \left[d_i - \frac{M_i}{M_T} d_T \right] \dot{\delta}_0 + \\ & + P_{m_i} - P_{g_i} - \frac{M_i}{M_T} P_c, \end{aligned} \quad (4.6.7)$$

$$\text{onde: } d_T = \sum_{i=1}^{n_g} d_i$$

$$P_c = \sum_{i=1}^{n_g} (P_{m_i} - P_{g_i})$$

4.6.3.2 - Definição da Superfície Limite de Energia Potencial - SLEP

A idéia básica da Análise de Estabilidade Transitória, utilizando a SLEP, consiste em se monitorar a trajetória de estado do sistema na situação pós-falta, verificando-se se esta trajetória cruza a SLEP, o que caracteriza condição de instabilidade. Adicionalmente, no caso de curto-circuito trifásico, monitora-se a trajetória de estado durante a falta, sendo necessário para isto, a definição de Conjunto Invariante [6,10], apresentado neste trabalho, no apêndice A.

Para a Análise de Estabilidade Transitória via SLEP, necessita-se ainda da definição da Função Energia, utilizada como função de Liapunov. apresentada abaixo:

$$V(\theta, \omega) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{n_g} M_i \cdot \omega_i^2 - \sum_{i=1}^{n_g} \int_{\theta_i^c}^{\theta_i} g_i(\theta) d\theta_i, \quad (4.6.8)$$

onde: $g_i(\theta) = M_i \cdot \dot{\omega}_i = P_{m_i} - P_{g_i} - \frac{M_i}{M_T} P_c$, de acordo com a referência Centro de Ângulo, vista na subseção 4.6.3.1.

Os termos da equação 4.6.8, são respectivamente a Energia Cinética $E_c(\omega)$ e a Energia Potencial $E_p(\theta)$ do sistema.

Assim, a definição da SLEP é dada como segue:

Considere-se θ^e um estado de equilíbrio do sistema, estável no sentido de Liapunov. Com os raios tirados a partir de θ^e :

$$\theta^1 = \theta^e + \lambda u, \lambda \in \mathbb{R}, \lambda \geq 0, \quad (4.6.9)$$

e o vetor unitário :

$$u = \frac{\theta^1 - \theta^e}{\|\theta^1 - \theta^e\|}, \quad (4.6.10)$$

define-se a SLEP como sendo o conjunto:

$$S \{ \theta \mid \theta = \theta^e + \lambda^* u \},$$

$$\text{onde: } \lambda^* = \text{Min} \left\{ \lambda \mid \frac{\partial E_p(\theta^e + \lambda u)}{\partial \lambda} = 0 \right\}, \quad (4.6.11)$$

$\frac{\partial E_p}{\partial \lambda}$ é a derivada direcional da Energia Potencial, definida para a configuração pós-falta.

Aplicando-se a derivada direcional ao segundo termo de 4.6.7, supondo-se ainda a integração realizada ao longo de cada raio definido na equação 4.6.8, tem-se:

$$\frac{\partial E_p}{\partial \lambda} = - \sum_{i=1}^{n_g} g_i(\theta^e + \lambda u) u_i \quad (4.6.12)$$

No ponto de cruzamento de um determinado raio com a SLEP, tem-se:

$$\left. \frac{\partial E_p(\lambda)}{\partial \lambda} \right|_{\lambda^*} = - \sum_{i=1}^{n_g} g_i(\theta^e + \lambda^* u) u_i = 0 \quad (4.6.13)$$

A equação 4.6.13 pode ser escrita ainda da seguinte maneira:

$$\left. \frac{\partial E_p(\lambda)}{\partial \lambda} \right|_{\lambda^*} = - \frac{1}{\|\theta^1 - \theta^e\|} \sum_{i=1}^{n_g} g_i(\theta^*) \cdot (\theta_i^1 - \theta_i^e) = 0 \quad (4.6.14)$$

Considerando-se todos os raios a partir de θ^e , a SLEP fica caracterizada por:

$$\nabla E_p(\theta) \cdot (\theta^1 - \theta^e) = \sum_{i=1}^{n_g} g_i(\theta) \cdot (\theta_i^1 - \theta_i^e) = 0 \quad (4.6.15)$$

Na forma vetorial:

$$g^T(\theta) \cdot (\theta^1 - \theta^e) = 0 \quad (4.6.16)$$

O cruzamento da trajetória de estado do sistema com a SLEP, pode então ser detectado pela monitoração do sinal do produto escalar 4.6.16, que é negativo na região interna da SLEP, nulo no ponto de cruzamento e positivo numa vizinhança da SLEP, após o cruzamento [6,10].

Com a definição da SLEP, apresenta-se na figura 4.6.1, o fluxograma simplificado para a determinação do limite de viabilidade de uma configuração do sistema de transmissão. O algoritmo passo a passo, encontra-se descrito no apêndice B.

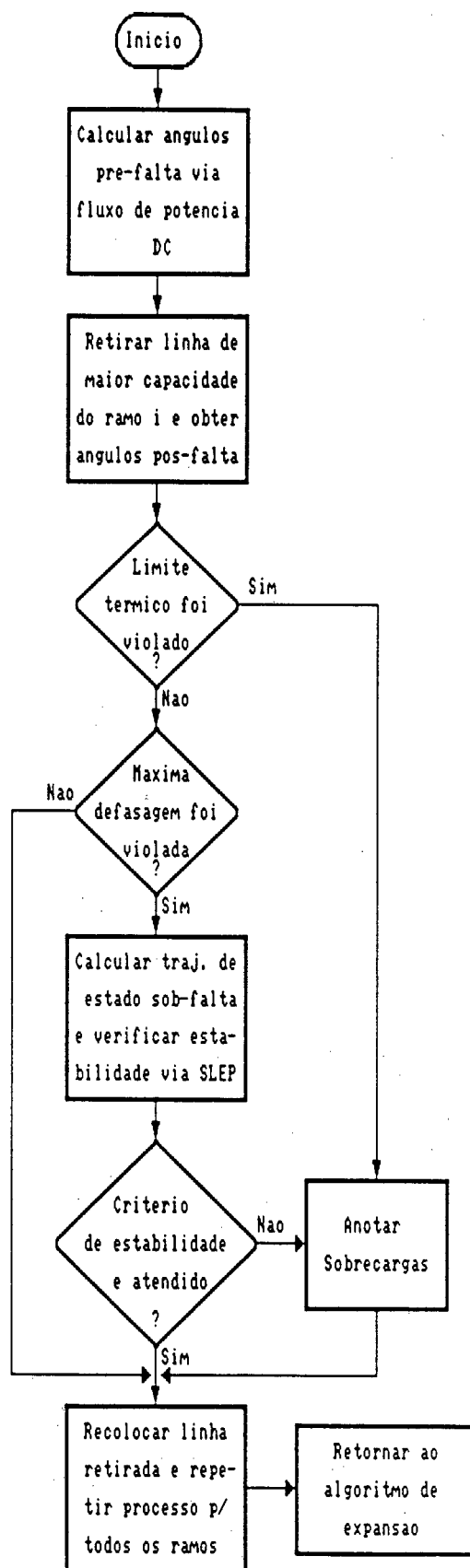


Figura 4.6.1 - Fluxograma simplificado para determinação do limite de viabilidade de uma configuração do sistema de transmissão.

4.7 - Problema de Planejamento a Curto Prazo

O problema de planejamento a curto prazo consiste na viabilização de uma configuração, em um estágio, através da transição de estado de menor custo.

O efeito deste procedimento sobre a expansão a longo prazo via busca em grafo, é o de incluir na Lista Aberta, somente configurações que viabilizem a curto prazo, a sua configuração antecessora. Tem-se então, a expansão a longo prazo, realizada a partir de sucessivas expansões a curto prazo.

Supondo-se que uma determinada configuração C , gerada no estágio k , não seja viável pela inclusão de apenas uma linha de transmissão, no estágio $k+1$, apresentando sobrecarga em um determinado número de linhas, então a configuração C deve ser reforçada, com base nas sobrecargas existentes e ser submetida a uma nova análise de segurança. Repete-se o procedimento até que a configuração C , com as linhas adicionadas, seja viável em $k+1$.

A inclusão das linhas adicionais, para o reforço de C , deve obedecer a uma seqüência, estabelecida com base em um critério de eficiência [2], que considera o nível de carregamento de cada linha.

4.7.1 - Cálculo do Critério de Eficiência

O critério de eficiência, para uma linha adicional, é calculado simulando-se o desempenho da rede após a sua inclusão. Quando uma linha é adicionada para reforçar C , gera uma nova configuração C' , a princípio

não pertencente ao grafo H , para a qual é calculado o Coeficiente de Carregamento definido abaixo:

$$r(C') = \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot h_i \quad (4.7.1)$$

$$\text{Onde: } h_i = \begin{cases} \hat{\phi}_i(C') / \bar{\phi}_i(C')^2 & \text{se } |\hat{\phi}_i(C')| < \bar{\phi}_i(C') \\ \alpha \times (\hat{\phi}_i(C') / \bar{\phi}_i(C'))^2 & \text{se } |\hat{\phi}_i(C')| \geq \bar{\phi}_i(C'), \text{ com } \alpha > 1. \end{cases}$$

β_i é o custo de uma linha para o ramo i ;

α é um fator de penalização;

$\hat{\phi}_i$ e $\bar{\phi}_i$ são definidos em 4.6.2.

O Critério de Eficiência de C' , é então calculado por:

$$g(C, C') = \frac{r(C) - r(C')}{c(C, C')} \quad (4.7.2)$$

Onde: $c(C, C')$ é o custo de transição de C para C' .

Determina-se este critério para cada configuração gerada pela inclusão das linhas adicionais. A ordenação da seqüência de linhas é feita em ordem decrescente dos Critérios de Eficiência das configurações correspondentes.

O critério aqui apresentado, tem a finalidade de aumentar a eficiência do algoritmo para o estudo de sistemas de grande porte e nada se

perde em termos de resultados. A sua formulação prevê a penalização das configurações sobrecarregadas, através de α e a influência de cada defasagem $\hat{\phi}_1(\mathbb{C})$ sobre $r(\mathbb{C})$ deve ser tanto maior quanto mais alto for o custo de reforço no ramo.

4.8 - Conclusão

A modelagem do sistema para a expansão da transmissão, se mostra mais complexa pois, neste caso considera-se a rede básica completa, com o conjunto de nós com seus parâmetros correspondentes e de ramos, para orientar a expansão.

Os critérios de segurança considerados, levam em conta dois aspectos importantes: O limite máximo de carregamento dos ramos do sistema e a estabilidade transitória, no caso de contingências tipo curto-circuito e perda de linha e/ou transformador.

A estabilidade transitória pode ser analisada com o uso do programa SLEP, que baseia-se em uma superfície que tem comportamento análogo à um "divisor de águas", estabelecendo uma fronteira entre as regiões de estabilidade e instabilidade do sistema. Por se considerar a monitoração do estado do sistema sob falta, conseguem-se resultados menos conservativos que os obtidos em outros trabalhos, como se demonstra em [16].

O planejamento a curto prazo, surge como uma forma de se resolver o problema de viabilização de configurações sobrecarregadas.

No próximo capítulo, será vista a metodologia proposta para a

expansão integrada dos sistemas de geração e transmissão.

CAPÍTULO V

5 - METODOLOGIA PROPOSTA PARA O PLANEJAMENTO INTEGRADO DE SISTEMAS ELÉTRICOS

5.1 - Introdução

Neste capítulo, apresenta-se o problema de planejamento integrado, a partir dos problemas de expansão do parque gerador e da rede de transmissão.

Para isto, apresenta-se um algoritmo que permite a solução do problema de planejamento integrado, descrevendo-se o processo em suas diversas etapas, juntamente com as informações necessárias à obtenção dos resultados.

5.2 - Metodologia Proposta

5.2.1 - Pré-Ordenação das Usinas Disponíveis e Obtenção do Conjunto de Usinas Viáveis

Escolhe-se inicialmente, mediante um critério qualquer, como conjunto de usinas viáveis, um elenco de usinas, dentro do conjunto total de usinas passíveis de construção, considerando-se o período de planejamento, cuja soma das capacidades de geração (Ponta e Energia Firme), seja suficiente para suprir o acréscimo total de demanda desde o ano inicial até o ano horizonte.

Como critério de seleção inicial, pode-se escolher as usinas com menor custo. Para isto, basta considerar a ordenação das usinas

disponíveis, em ordem crescente de custos médios de geração (US\$/MWh).

Tal procedimento poderá não levar à obtenção da melhor seqüência possível de construção de usinas, já que soluções mais atrativas podem ser encontradas pela consideração de todas as usinas disponíveis. No entanto, considerar apenas as usinas mais atrativas no processo de busca em grafo, resulta na redução do número de alternativas de expansão a serem analisadas, reduzindo o esforço computacional necessário, quando da expansão do sistema.

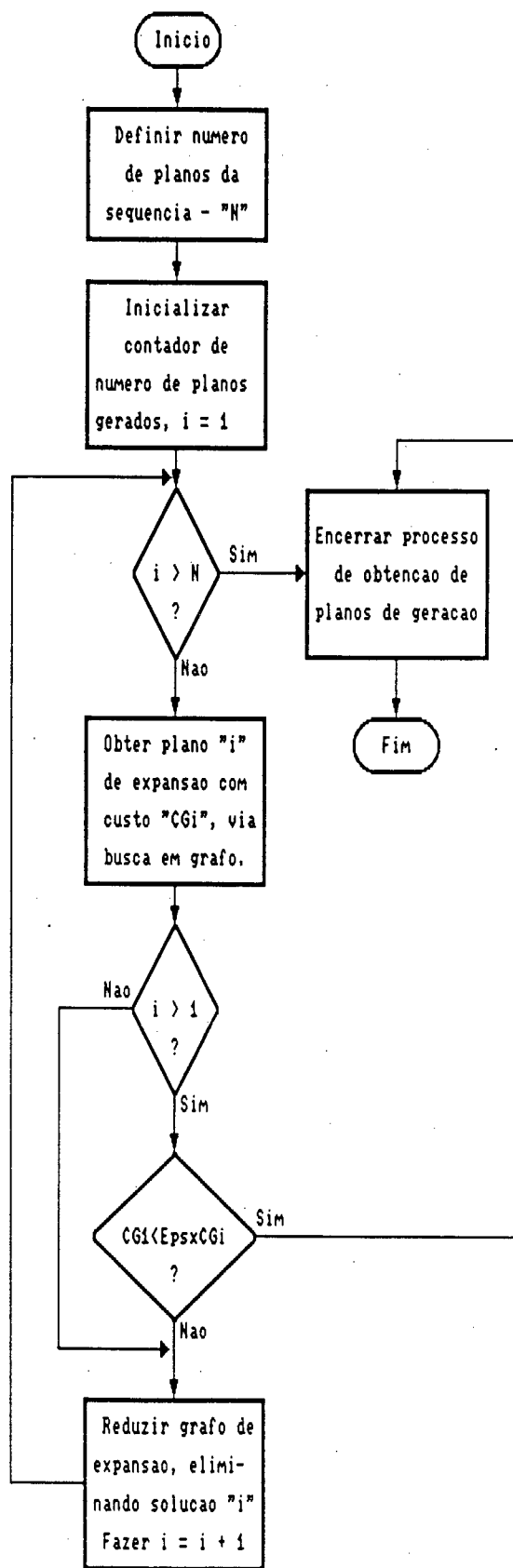
5.2.2 - Seqüência Inicial de Planos de Expansão da Geração

Escolhido o elenco de usinas, inicia-se o processo de determinação do melhor plano integrado, pela elaboração de uma seqüência de planos de expansão do sistema de geração, em ordem crescente de custos e sem considerar os custos relativos à transmissão. Para isto, o algoritmo descrito na subseção 2.4.5 deverá ser executado n vezes, sendo n o número de planos de expansão desejados.

O uso de um procedimento de redução do grafo de expansão, possibilita a obtenção dos planos em ordem decrescente de atratividade pois, a cada redução elimina-se do grafo a solução ou plano ótimo anterior, restando apenas os caminhos que ainda não foram obtidos como solução. Apresenta-se na figura 5.2.1, o fluxograma simplificado para a determinação da seqüência de planos de expansão do sistema de geração.

Observa-se nesta figura, que o processo de obtenção da seqüência de planos de geração pode ser interrompido, no momento em que a

variação de custos de um determinado plano, com relação ao primeiro plano gerado, se torne maior que um valor pré-determinado.



Eps - Coeficiente variando entre 0 e 1.

Figura 5.2.1 - Fluxograma simplificado para a obtenção da sequência de planos de expansão do sistema de geração.

5.2.3 - Estabelecimento dos Despachos de Geração

O despacho de geração das usinas para cada estágio de planejamento, determina o ponto de operação do sistema, utilizado na Análise de Segurança.

Neste trabalho, o despacho de geração é dado em função dos requisitos de demanda de Ponta (MW) e calculado de forma proporcional às capacidades instaladas de cada usina.

5.2.4 - Limitante Inferior de Custo de Transmissão

Para a determinação do melhor plano integrado, os planos de expansão devem ser comparados em termos de custos globais. Neste caso, seria necessária a obtenção de planos de expansão ótimos para a transmissão, correspondentes a cada plano de expansão da geração inicialmente obtido.

Observa-se no entanto, que tal procedimento exigiria grande esforço computacional, uma vez que o processo de expansão da transmissão via busca em grafo, exige em geral, grande esforço computacional, por envolver o estudo de Análise de Segurança, como visto na seção 4.6, além de um elevado número de alternativas de reforço a considerar.

Por isto, pode-se propor a utilização de um coeficiente definido como Limitante Inferior de Custo de Transmissão, para fornecer estimativas iniciais para o custo de expansão da rede. Assim, usando-se este coeficiente no algoritmo final, obtém-se uma aceleração do processo de determinação dos planos integrados de expansão.

5.3 - Dados Básicos do Sistema Elétrico

Apresentam-se agora, os principais dados referentes ao sistema elétrico e à metodologia de busca em grafos, necessários à solução do problema de planejamento integrado.

5.3.1 - Dados de Demanda de Energia Elétrica

Os valores de demanda prevista em termos de Ponta (MW) e Energia (MWh), devem ser fornecidos para cada estágio do período de planejamento. São necessários o montante global de demanda requerida pelo sistema e os valores de demanda de Ponta para as barras de carga, que usualmente correspondem aos principais centros de consumo existentes.

5.3.2 - Dados do Parque Gerador

Referem-se basicamente à capacidade de geração das usinas já existentes e das novas usinas, conforme colocado abaixo:

- Capacidades de geração (Potência Instalada - MW e Energia Firme - MWh) das usinas existentes e em operação até o ano inicial;
- Capacidades de geração das novas usinas, adicionando-se o número de máquinas e potência unitária (MW) das mesmas;
- Usinas já definidas e usinas a serem desativadas ao longo do período de planejamento, com suas respectivas capacidades de geração;
- Reatância transitória e inércia de todas as máquinas do sistema.

5.3.3 - Dados da Rede de Transmissão

Referem-se aos parâmetros das linhas de transmissão e transformadores que compõem a rede básica, definida na seção 4.2.

- Tensão nominal em kV, tipo de linha (em função da tensão), limite térmico de transmissão em pu, comprimento em Km e impedâncias em pu/Km de todas as linhas da rede básica;
- Impedâncias série e admitâncias shunt em pu, de todas as linhas da rede básica;
- Impedâncias série em pu e limite de transmissão em pu de todos transformadores da rede básica.

5.3.4 - Dados de Custos de Construção e Montagem de Equipamentos

Constituem as informações necessárias para a quantificação dos custos das diversas alternativas de expansão do sistema e dos custos totais dos planos de expansão.

- Custos de construção em US\$ e custos médios de geração em US\$/MWh, para as novas usinas: Os custos de construção encontram-se distribuídos ao longo do período de construção das usinas, na forma de fluxos de desembolsos percentuais, como os mostrados na tabela 5.3.1, em valores típicos. Pode-se eventualmente, utilizar-se fluxos de desembolsos individualizados para cada usina, com valores percentuais próprios de cada uma.

- Custos de montagem de unidades: Estes custos são dados como percentagem do custo de construção das usinas e podem ser incluídos também, no fluxo de desembolsos;
- Custos de construção de linhas de transmissão em US\$/Km, dados em função do tipo de linha.

Tabela 5.3.1 - Fluxos de desembolsos típicos para a construção de usinas.

USINA	PERÍODO DE CONSTRUÇÃO									
	X-8	X-7	X-6	X-5	X-4	X-3	X-2	X-1	X	X+1
HIDRO	--	--	2%	7%	17%	21%	21%	20%	9%	3%
CARVÃO	--	--	0,5%	4%	23%	46%	21%	5%	0,5%	--
NUCLEAR	5%	7%	8%	14%	20%	20%	14%	8%	4%	--

X - Ano de entrada em operação.

5.3.5 - Dados Gerais do Processo de Busca em Grafo

Referem-se aos parâmetros utilizados para o controle do processo de busca, na expansão da geração e da transmissão. São eles:

- Número de planos integrados desejados (n);
- Número máximo de configurações geradas na Lista Fechada;
- Número máximo de iterações para expansão da geração e da transmissão;
- Limitante inferior de custo de transmissão.

5.3.6 - Outros Dados de Interesse

- Níveis percentuais de reserva de geração (Ponta e Energia);
- Máxima defasagem permitida para os ramos da rede (ϕ_{\max});
- Tempo de abertura de disjuntores, dado em função do tipo de linha;
- Número de contingências a serem analisadas (expansão da transmissão);
- Taxa de atratividade para descontar custos em relação ao ano inicial;
- Parâmetros para monitoração da trajetória do sistema:
 - Tempo máximo de simulação;
 - Intervalo de monitoração;
 - Intervalo para renovação dos coeficientes da Série de Taylor.

5.4 - Algoritmo Para Determinação de Planos Integrados de Expansão

Para a apresentação do algoritmo relativo à obtenção dos planos integrados de expansão, são necessárias as seguintes definições:

- Par ordenado (G_k, CG_k) - k-ésimo plano de expansão da geração e custo correspondente.
- Par ordenado (T_k, CT_k) - k-ésimo plano de expansão da transmissão e custo correspondente.
- M - Limitante inferior de custo de transmissão, variando entre 0 e 1.

Com as definições anteriores, pode-se formular o problema de obtenção do melhor plano integrado de expansão, da seguinte maneira:

Determinar a política integrada de expansão $(G + T)^*$, tal que:

$$(CG + CT)^* = \text{Min } (CG_k + CT_k), \text{ para } k = 1, 2, \dots, n.$$

Onde: n é o número máximo de planos integrados que se deseja obter.

5.4.1 - O Algoritmo

Estabelecidas as bases para a obtenção dos planos de expansão de geração e transmissão, considerando-se o algoritmo A^* de busca de caminho de mínimo custo em grafos, para a determinação de planos integrados de expansão pode-se utilizar o algoritmo abaixo:

Passo 0: Definir o número máximo de planos de expansão desejados " n ".

Passo 1: Gerar, via busca em grafo, os planos de expansão da geração (G_k, CG_k) , para $k = 1, 2, \dots, n$, ordenados pelo custo.

Fazer $i = 1$.

Passo 2: Gerar o plano de expansão da rede de transmissão (T_i, CT_i) , correspondente a (G_i, CG_i) .

Se $i > 1$, ir ao passo 3.

Senão, fazer $CT_k = M \times CT_1$, para $k = 2, 3, \dots, n$.

Passo 3: Reordenar a seqüência de planos de expansão, em termos de custos globais $CG + CT$.

Passo 4: Considerar o primeiro plano da nova seqüência obtida $(G_k + T_k)$.

Verificar se para o plano de geração (G_k, CG_k) , já foi obtido o correspondente plano de transmissão (T_k, CT_k) , via busca em grafo.

* SIM - Plano $(G_k, CG_k) + (T_k, CT_k)$ é o melhor plano integrado de expansão.

* NÃO - Fazer $i = k$ e ir ao passo 2.

5.4.2 - Desempenho do Algoritmo

A primeira reordenação da seqüência de planos em termos de custos globais, feita no passo 3, considera custos estimados da expansão da transmissão, do segundo até o n -ésimo plano. Esta estimativa é dada em função do custo de transmissão do primeiro plano, através do coeficiente M .

Estimativas baixas, ou seja, baixos valores de M , fazem com que mais planos integrados sejam gerados, respeitando-se o limite n , com a expansão da transmissão feita no passo 2. Ao contrário, valores de M próximos a 1, fazem com que o critério de parada no passo 4 seja satisfeito mais rapidamente e um número menor de planos é gerado [15].

Deve-se observar que a obtenção do plano integrado ótimo, dentro do limite de n planos desejados, só é garantida se for utilizado um valor para M , que permita a geração de todos os planos integrados. Este limite deve ser estabelecido, levando-se em conta a disponibilidade computacional existente, além do fato de que se torna desinteressante a geração de um número muito grande de planos, já que dificilmente os planos situados nas posições inferiores da seqüência inicial, se apresentarão como melhor plano integrado, ao final do processo.

5.5 - Conclusão

A metodologia aqui proposta, permite a obtenção do melhor plano integrado de expansão, do ponto de vista econômico, considerando critérios de segurança estáticos e dinâmicos de operação do sistema. Isto se torna possível devido à admissibilidade do algoritmo de busca em grafo, juntamente com a utilização adequada do Limitante Inferior de Custo de Transmissão.

Em muitos casos, caberá ao planejador, estabelecer valores para os diversos parâmetros que controlam o processo global de expansão, utilizando a sua experiência e conhecimento do sistema em estudo, no sentido de obter soluções satisfatórias para o problema de planejamento integrado, dentro do tempo e recursos computacionais disponíveis.

CAPÍTULO VI

6 - EXEMPLOS E RESULTADOS

6.1 - Introdução

Neste capítulo, aplica-se a metodologia proposta para o Planejamento Integrado, a dois sistemas exemplo, procurando-se mostrar de maneira quantitativa, a influência da consideração dos custos de expansão da transmissão, na escolha do melhor plano de expansão.

Como resultados, são apresentados os custos de expansão individualizados e globais (geração + transmissão) dos diversos planos gerados, em função dos parâmetros de controle utilizados, além do melhor plano integrado de expansão. Este plano será apresentado em tabelas contendo o cronograma de obras do parque gerador, seu despacho de geração associado e o respectivo cronograma de obras da rede de transmissão.

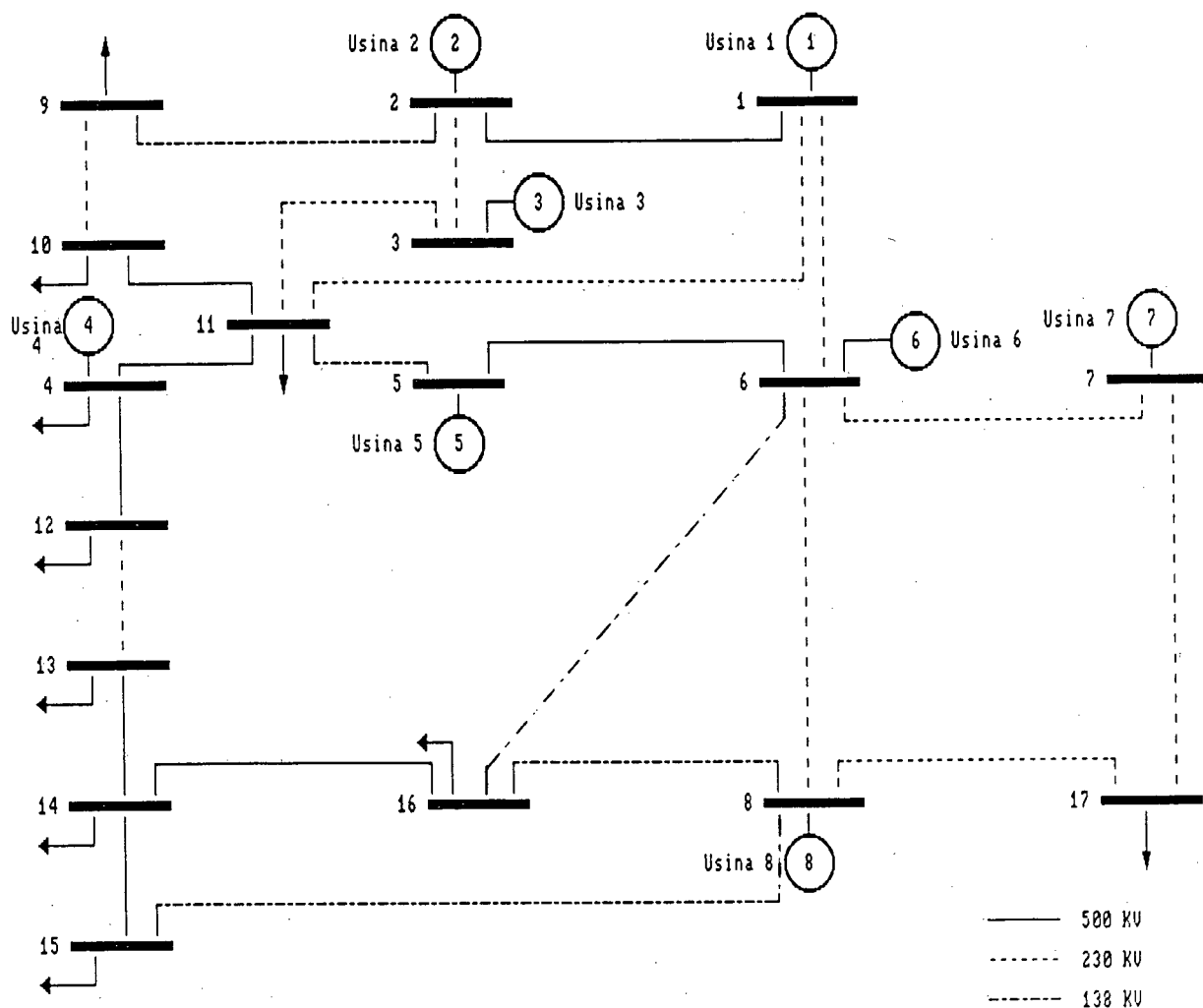
Considera-se, na Análise de Contingências, defeito tipo curto-circuito trifásico, com monitoração da trajetória dos ângulos dos geradores, durante defeito, seguido da retirada do equipamento defeituoso.

Este algoritmo, combina os algoritmos de busca em grafo, para a expansão dos sistemas de geração e transmissão, formando um programa computacional, implementado na linguagem FORTRAN.

6.2 - Exemplo 1: Sistema de 17 Barras

O sistema, cujo diagrama unifilar é mostrado na figura 6.2.1, possui a seguinte configuração inicial:

- 17 barras;
- 23 linhas de transmissão;
- 4 usinas geradoras.



Considera-se um período de planejamento de 10 anos. Os dados básicos das usinas, existentes e novas, parâmetros de máquinas, linhas de transmissão, demanda total (Ponta e Energia) e demanda de Ponta por barra, são mostrados respectivamente nas tabelas 6.2.1, 6.2.2, 6.2.3, 6.2.4, 6.2.5 e 6.2.6 a seguir:

Tabela 6.2.1 - Usinas geradoras existentes.

Usina	Pot. Total (MW)	En. Firme (MWh)
Usina 1	4 x 75 = 300	265
Usina 2	2 x 35 = 70	52
Usina 3	2 x 125 = 250	200
Usina 4	5 x 65 = 325	270

Tabela 6.2.2 - Novas usinas geradoras.

Usina	Pot. Total (MW)	En. Firme (MWh)	Custo de Const. (US\$)
Usina 5	3 x 100 = 300	270	560.000.000,00
Usina 6	4 x 50 = 200	176	350.000.000,00
Usina 7	2 x 125 = 250	190	500.000.000,00
Usina 8	4 x 70 = 280	205	600.000.000,00

Tabela 6.2.3 - Parâmetros de máquinas.

Usina	Reatância Transitória x'a (pu)	Reatância Transitória Equivalente (pu)	Inércia H (seg)
Usina 1	0,3145	0,0787	5,69
Usina 2	0,4010	0,2005	3,12
Usina 3	0,3620	0,1810	5,24
Usina 4	0,4503	0,0901	2,53
Usina 5	0,2918	0,0973	4,84
Usina 6	0,3070	0,0767	4,98
Usina 7	0,2513	0,1257	6,54
Usina 8	0,4443	0,1111	1,78

Tabela 6.2.4 - Parâmetros de linhas de transmissão.

Linha	Barras			Tipo	Impedância Série (pu)	Limite Térmico (pu)	Distância (Km)
	Inic	-	Term				
1	1	-	2	1	0,0000 + j0,0685	9,80	218,85
2	1	-	6	2	0,0000 + j0,2072	3,52	167,54
3	1	-	11	2	0,0000 + j0,2473	3,20	199,92
4	2	-	3	2	0,0000 + j0,1063	7,84	85,93
5	2	-	9	3	0,0000 + j0,2833	2,80	61,57
6	3	-	11	2	0,0000 + j0,2118	3,50	171,22
7	4	-	11	2	0,0000 + j0,1533	4,85	123,93
8	4	-	12	1	0,0000 + j0,0547	12,00	174,76
9	5	-	6	1	0,0000 + j0,0619	10,00	197,76
10	5	-	11	3	0,0000 + j0,2628	2,90	57,12
11	6	-	7	2	0,0000 + j0,1297	5,50	102,43
12	6	-	8	2	0,0000 + j0,2347	3,50	189,73
13	6	-	16	3	0,0000 + j0,4141	1,90	90,00
14	7	-	17	2	0,0000 + j0,1545	4,50	124,90
15	8	-	15	3	0,0000 + j0,3007	2,00	65,36
16	8	-	16	3	0,0000 + j0,2611	2,00	56,75
17	8	-	17	2	0,0000 + j0,1811	3,84	146,40
18	9	-	10	2	0,0000 + j0,1164	5,00	94,10
19	10	-	11	1	0,0000 + j0,0649	8,45	207,35
20	12	-	13	2	0,0000 + j0,1005	6,50	81,24
21	13	-	14	1	0,0000 + j0,0446	12,00	142,49
22	14	-	15	1	0,0000 + j0,0940	6,00	300,31
23	14	-	16	1	0,0000 + j0,0586	10,00	187,22

Tipo	Tensão Nominal (KV)	Impedância por Km (pu)	Custo p/Km
1	500	0,000000 + j0,000313	0,00200
2	230	0,000000 + j0,001237	0,00100
3	138	0,000000 + j0,004601	0,00070

Tabela 6.2.5 - Dados de demanda total.

Ano	Ponta (MW)	Energia (MWh)
1997	800,6	636,0
1998	1023,0	810,0
1999	1240,0	1050,0
2000	1395,0	1130,0
2001	1486,0	1196,0
2002	1535,0	1210,0
2003	1627,0	1290,0
2004	1737,0	1376,0
2005	1821,0	1438,0
2006	1875,0	1495,0

Tabela 6.2.6 - Dados de demanda de Ponta por barra (MW).

Barra	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
9	104,0	120,0	132,0	140,0	150,0	152,0	200,0	200,0	203,0	205,0
10	0,0	60,0	103,0	120,0	125,0	131,0	137,0	142,0	142,0	150,0
11	176,6	210,0	250,0	280,0	280,0	283,0	288,0	300,0	312,0	325,0
12	58,5	68,0	100,0	150,0	150,0	170,0	174,0	195,0	205,0	210,0
13	78,0	100,0	130,0	135,0	136,0	136,0	140,0	150,0	159,0	160,0
14	62,8	85,0	115,0	120,0	122,0	123,0	128,0	131,0	152,0	155,0
15	175,6	205,0	210,0	210,0	218,0	220,0	231,0	234,0	250,0	255,0
16	132,0	150,0	160,0	180,0	205,0	210,0	215,0	242,0	248,0	255,0
17	13,1	25,0	40,0	60,0	100,0	110,0	114,0	143,0	150,0	165,0

6.2.1 - Planos de Expansão da Geração

A tabela 6.2.7 apresenta, na coluna 2, os valores dos 5 melhores planos de geração, obtidos com o programa de expansão, considerando apenas custos relativos aos equipamentos de geração. Na coluna 3, estimando-se em 10% o custo de integração das usinas, apresenta-se o custo global (geração+transmissão) estimado. Os valores são referidos ao ano base (1997).

Deve-se ressaltar que o valor da 2.^o coluna e o correspondente valor da 3.^o coluna, referem-se à uma mesma sequência de construção de usinas.

Tabela 6.2.7 - Custos de expansão do sistema de geração.

Custos de Expansão - US\$		
Plano	Só Equipamentos de Geração	Geração + Transmissão Estimada
1	1.765.092.900,00	1.911.888.900,00
2	1.769.806.600,00	1.916.826.400,00
3	1.771.555.300,00	1.918.662.900,00
4	1.773.509.100,00	1.920.996.400,00
5	1.778.401.000,00	1.925.880.800,00

A utilização do programa para a expansão integrada, sem a consideração explícita da transmissão, conforme visto acima, produz como resultados preliminares, uma lista de cronogramas de expansão do parque gerador, ordenada pelo custo e consiste de uma estimativa, quando se inclui o custo aproximado da transmissão, do custo total de expansão do sistema.

Utilizaram-se os seguintes valores para o controle do processo de busca, na expansão do sistema de geração:

- Número de iterações - 3
- Número máximo de configurações de geração na lista fechada - 20

O custo global, com estimativa para a transmissão, referente ao plano 1 (primeiro valor do lado direito da tabela), pode ser considerado como o custo global de expansão, quando se realiza o planejamento desacoplado. Para a determinação do melhor plano integrado, serão utilizados os valores do lado esquerdo da tabela, aos quais serão somados os custos de transmissão obtidos via busca em grafo.

6.2.2 - Determinação do Melhor Plano Integrado

Neste item, é considerada de forma explícita, a expansão do sistema de transmissão. Neste caso, atribuem-se os valores de 0,7, 0,8 e 0,9 para o coeficiente M.

O algoritmo integrado, fornece em função desses valores, as soluções que estão mostradas na tabela 6.2.8. Na coluna 2, estão anotados o número de planos integrados obtidos, para cada valor de M. Na coluna 3, são apresentados os melhores planos integrados de expansão. A coluna 4, ilustra a dependência do esforço computacional, também em relação a M.

Tabela 6.2.8 - Desempenho do algoritmo final em função do Limitante Inferior de Custo de Transmissão.

M	Número de Planos Integrados Gerados Pelo Algoritmo	Melhor Plano Integrado	Tempo de CPU
0,7	5	Plano 5	7'23''
0,8	4	Plano 2	6'05''
0,9	2	Plano 2	3'25''

Observa-se a influência do coeficiente M no processo de determinação do melhor plano integrado. A obtenção do melhor plano, só foi conseguida para valores de M iguais ou menores que 0,7.

A consideração apenas do valor de M igual a 0,9, traria benefícios em termos de custo computacional. Porém, a solução obtida não seria muito satisfatória, em termos de custos globais de expansão.

Para a expansão da transmissão, os parâmetros de controle foram

fixados nos seguintes valores:

- Número de iterações - 5
- Número máximo de configurações geradas na lista fechada - 25

A tabela 6.2.9, mostra os custos de transmissão, obtidos para os 5 planos integrados gerados pelo programa ($M = 0,7$). Apresenta-se também, para cada plano, a iteração em que foi obtida a solução considerada, dentro do limite estabelecido de 5 iterações.

Tabela 6.2.9 - Custos de expansão do sistema de transmissão.

Plano	Custo de Expansão (US\$)	Iteração Em Que Foi Obtido
1	73.980.496,00	1
2	66.386.224,00	3
3	66.386.224,00	1
4	73.980.496,00	1
5	47.021.792,00	1

Os custos globais para os 5 planos integrados obtidos, são mostrados na tabela 6.2.10 abaixo, em ordem decrescente de atratividade.

Tabela 6.2.10 - Custos globais de expansão.

Plano	Custo (US\$)		
	Geração	Transmissão	Total
5	1.778.401.000,00	47.021.792,00	1.825.422.792,00
2	1.769.806.600,00	66.386.224,00	1.836.192.824,00
3	1.771.555.300,00	66.386.224,00	1.837.941.524,00
1	1.765.092.900,00	73.980.496,00	1.839.073.396,00
4	1.773.509.100,00	73.980.496,00	1.847.489.596,00

Assim, o plano 5 é o mais atraente do ponto de vista econômico. Isto mostra que, neste caso, a consideração da transmissão de forma integrada,

reduz o custo total de US\$ 86.466.108,00 em relação ao menor custo total estimado (tabela 6.2.7), de US\$ 10.770.032,00 em relação ao segundo melhor plano integrado (plano 2) e de US\$ 13.650.604,00 em relação ao plano integrado 1.

A tabela 6.2.11, mostra o melhor cronograma de obras do sistema de geração (Plano 5), obtido pelo processo de planejamento integrado.

Tabela 6.2.11 - Melhor cronograma de obras do sistema de geração.

Usina	Número de Unidades Alocadas por Ano									
	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Usina 7	--	02	--	--	--	--	--	--	--	--
Usina 5	--	--	02	01	--	--	--	--	--	--
Usina 6	--	--	--	--	02	01	01	--	--	--
Usina 8	--	--	--	--	--	--	01	01	02	--
Acréscimo (MW)	--	250,0	200,0	100,0	100,0	50,0	120,0	70,0	140,0	--
Acréscimo (MWh)	--	190,0	180,0	90,0	88,0	44,0	95,3	51,3	102,5	--
Pot. Total (MW)	945	1195	1395	1495	1595	1645	1765	1835	1975	1975
En. Firme Total (MWh)	787	977	1157	1247	1335	1379	1474	1526	1628	1628

Apresenta-se em seguida, na tabela 6.2.12, o pré-despacho de geração para as usinas do sistema, ao longo do período de planejamento e considerando o cronograma de construção das novas usinas (tabela anterior).

Tabela 6.2.12 - Pré-despacho de geração referente ao melhor plano integrado
(valores em p.u., na base 100 MVA).

Usina	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Usina 1	2,54	2,57	2,67	2,80	2,79	2,80	2,77	2,84	2,77	2,85
Usina 2	0,59	0,60	0,62	0,65	0,65	0,65	0,65	0,66	0,65	0,66
Usina 3	2,12	2,14	2,22	2,33	2,33	2,33	2,30	2,37	2,31	2,37
Usina 4	2,75	2,78	2,89	3,03	3,03	3,03	3,00	3,08	3,00	3,09
Usina 5	0,00	0,00	1,78	2,80	2,79	2,80	2,77	2,84	2,77	2,85
Usina 6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,93	1,40	1,84	1,89	1,84	1,90
Usina 7	0,00	2,14	2,22	2,33	2,33	2,33	2,30	2,37	2,31	2,37
Usina 8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,65	1,33	2,58	2,66

Por fim, a tabela 6.2.13, mostra o melhor cronograma de construção de linhas de transmissão, associado ao melhor cronograma de obras do parque gerador.

Tabela 6.2.13 - Melhor cronograma de obras do sistema de transmissão.

Linha	Ano de Construção
6 - 16	1997
8 - 15	1998
6 - 16	2000
5 - 6	2000
2 - 9	2002

No ano de 1997, embora nenhuma nova usina entre em operação, existe a necessidade de se reforçar uma linha de transmissão (6-16), devido unicamente à evolução da demanda.

6.3 - Exemplo 2: Sistema de 35 Barras

Parte-se da seguinte configuração inicial, conforme diagrama unifilar mostrado na figura 6.3.1:

- 35 barras;
- 55 linhas de transmissão e 7 transformadores.
- 5 usinas geradoras.

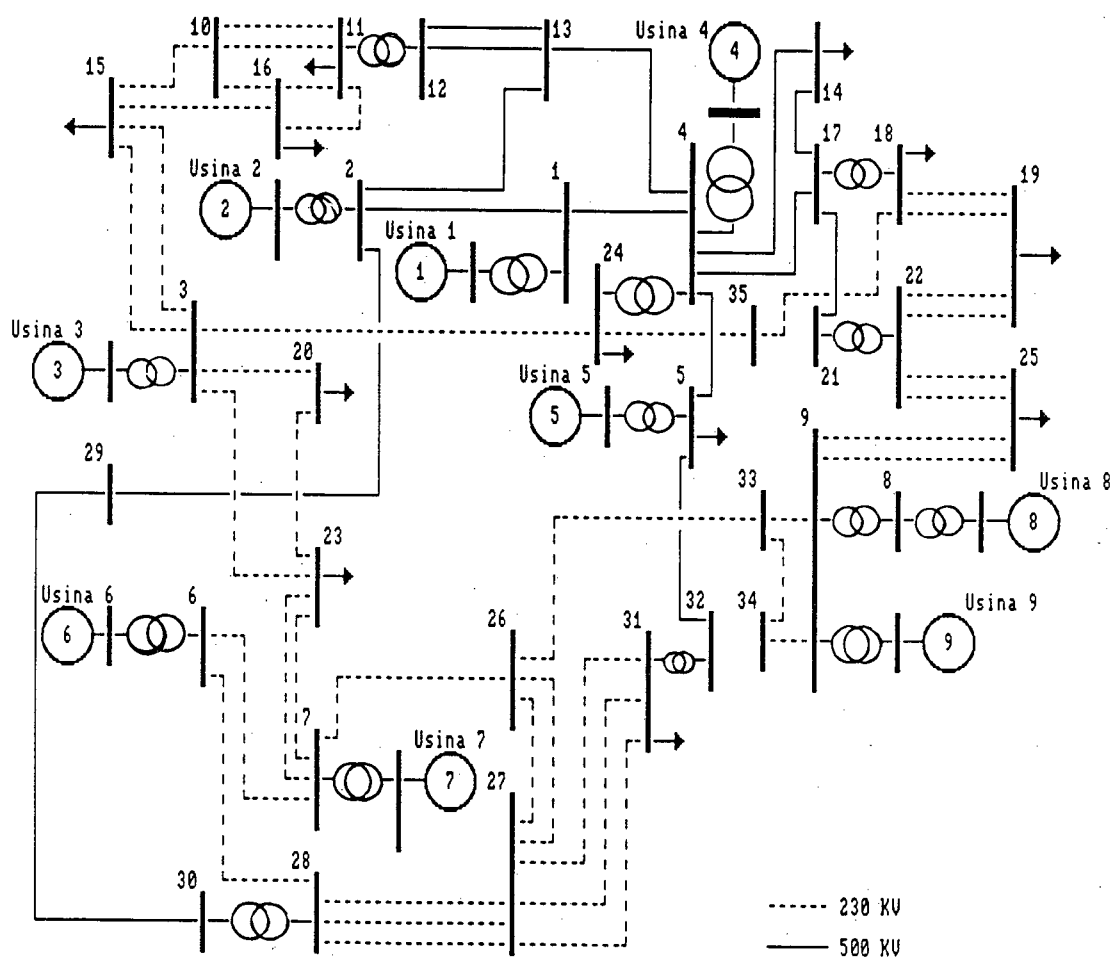


Figura 6.3.1 - Diagrama unifilar - Sistema Exemplo 2.

O período de planejamento é de 5 anos e os dados básicos são mostrados nas tabelas seguintes:

Tabela 6.3.1 - Usinas geradoras existentes.

Usina	Pot. Total (MW)	En. Firme (MWh)
Usina 1	6 x 300 = 1800	1400
Usina 2	3 x 400 = 1200	995
Usina 3	2 x 300 = 600	525
Usina 4	2 x 250 = 500	425
Usina 5	2 x 300 = 600	535

Tabela 6.3.2 - Novas usinas geradoras.

Usina	Pot. Total (MW)	En. Firme (MWh)	Custo de Const. (US\$)
Usina 6	2 x 250 = 500	270	210.000.000,00
Usina 7	6 x 50 = 300	190	180.000.000,00
Usina 8	2 x 150 = 300	210	180.000.000,00
Usina 9	3 x 100 = 300	190	300.000.000,00

Tabela 6.3.3 - Parâmetros de máquinas.

Usina	Reatância Transitória x'd (pu)	Reatância Transitória Equivalente (pu)	Inércia H (seg)
Usina 1	0,1270	0,0212	12,49
Usina 2	0,1428	0,0476	13,81
Usina 3	0,2802	0,1401	6,39
Usina 4	0,1232	0,0616	15,56
Usina 5	0,1649	0,0824	13,34
Usina 6	0,2856	0,1428	5,06
Usina 7	0,2890	0,0482	5,28
Usina 8	0,4400	0,2200	2,18
Usina 9	0,3196	0,1065	4,70

Tabela 6.3.4 - Parâmetros de linhas de transmissão.

Linha	Barras			Tipo	Impedância Série (pu)	Limite Térmico (pu)	Distância (Km)
	Inic	-	Term				
1	1	-	2	1	0,0005 + j0,0070	25,40	60,00
2	1	-	4	1	0,0005 + j0,0069	25,40	59,14
3	2	-	13	1	0,0014 + j0,0204	25,40	174,80
4	2	-	29	1	0,0014 + j0,0195	25,40	167,14
5	3	-	15	2	0,0344 + j0,1760	3,50	179,48
6	3	-	20	2	0,0153 + j0,0861	3,50	87,80
7	3	-	23	2	0,0316 + j0,1621	3,50	165,31
8	4	-	14	1	0,0019 + j0,0274	25,40	234,86

Tabela 6.3.4 - Continuação.

Linha	Barras			Tipo	Impedância Série (pu)	Limite Térmico (pu)	Distância (Km)
	Inic	-	Term				
9	3	-	24	2	0,0306 + j0,1523	3,50	155,31
10	4	-	5	1	0,0014 + j0,0195	25,40	167,14
11	4	-	17	1	0,0019 + j0,0280	25,40	240,00
12	4	-	13	1	0,0018 + j0,0227	25,40	194,57
13	5	-	32	1	0,0021 + j0,0309	25,40	264,86
14	6	-	7	2	0,0250 + j0,1548	3,50	157,86
15	6	-	28	2	0,0202 + j0,1129	3,50	115,13
16	7	-	23	2	0,0163 + j0,0835	3,50	85,15
17	7	-	26	2	0,0463 + j0,2378	3,50	242,50
18	9	-	25	2	0,0180 + j0,0920	3,50	93,82
19	9	-	33	2	0,0096 + j0,0491	3,50	50,07
20	9	-	34	2	0,0129 + j0,0657	3,50	67,00
21	10	-	11	2	0,0172 + j0,0884	3,50	90,15
22	10	-	15	2	0,0181 + j0,0929	3,50	94,74
23	10	-	16	2	0,0110 + j0,1184	3,50	120,74
24	11	-	16	2	0,0125 + j0,0641	3,50	65,36
25	12	-	13	1	0,0007 + j0,0145	25,40	124,28
26	14	-	17	1	0,0005 + j0,0069	25,40	59,14
27	15	-	16	2	0,0229 + j0,1174	3,50	119,72
28	17	-	21	1	0,0012 + j0,0175	25,40	150,00
29	18	-	19	2	0,0182 + j0,0935	3,50	95,35
30	19	-	22	2	0,0154 + j0,0776	3,50	79,13
31	20	-	23	2	0,0163 + j0,0835	3,50	85,15
32	22	-	25	2	0,0216 + j0,1105	3,50	112,68
33	24	-	35	2	0,0245 + j0,1256	3,50	128,08
34	26	-	27	2	0,0177 + j0,0910	3,50	92,80
35	26	-	33	2	0,0386 + j0,1985	3,50	202,43
36	27	-	28	2	0,0207 + j0,0933	3,50	95,14
37	27	-	31	2	0,0022 + j0,0111	3,50	11,32
38	29	-	30	1	0,0022 + j0,0300	25,40	257,14
39	33	-	34	2	0,0033 + j0,0167	3,50	17,03
40	18	-	35	2	0,0088 + j0,0415	3,50	42,32
41	3	-	15	2	0,0344 + j0,1760	3,50	179,48
42	7	-	23	2	0,0163 + j0,0835	3,50	85,15
43	7	-	26	2	0,0463 + j0,0920	3,50	242,00
44	9	-	25	2	0,0180 + j0,0884	3,50	93,82
45	10	-	11	2	0,0172 + j0,0884	3,50	90,15
46	11	-	16	2	0,0089 + j0,0461	3,50	47,01
47	12	-	13	1	0,0007 + j0,0145	25,40	124,28
48	18	-	19	2	0,0182 + j0,0935	3,50	93,35
49	19	-	22	2	0,0154 + j0,0776	3,50	79,13
50	22	-	25	2	0,0216 + j0,1105	3,50	112,69
51	26	-	27	2	0,0177 + j0,0910	3,50	92,80
52	27	-	28	2	0,0207 + j0,0933	3,50	95,14
53	27	-	28	2	0,0207 + j0,0933	3,50	95,14
54	27	-	31	2	0,0022 + j0,0111	3,50	11,32
55	27	-	31	2	0,0022 + j0,0111	3,50	11,32
56	8	-	9	1	0,0000 + j0,0590	170,00	505,54
57	11	-	12	1	0,0000 + j0,0063	170,00	53,98
58	17	-	18	1	0,0000 + j0,0062	170,00	53,12
59	21	-	22	1	0,0000 + j0,0062	170,00	53,12

Tabela 6.3.4 - Continuação.

Linha	Barras			Tipo	Impedância Série (pu)	Limite Térmico (pu)	Distância (Km)
	Inic	-	Term				
60	4	-	24	1	0,0000 + j0,0300	170,00	237,07
61	31	-	32	1	0,0000 + j0,0062	170,00	53,12
62	28	-	30	1	0,0000 + j0,0062	170,00	53,12
Tipo	Tensão Nominal (KV)			Impedância por Km (pu)			Custo p/Km
1	525			0,000008 + j0,000117			0,00117
2	230			0,000192 + j0,000981			0,00053

Tabela 6.3.5 - Dados de demanda total.

Ano	Ponta (MW)	Energia (MWh)
1997	4689,0	3050,0
1998	4910,9	3370,0
1999	5260,0	3620,0
2000	5457,5	3870,0
2001	5695,0	4050,0

Tabela 6.3.6 - Dados de demanda de Ponta por barra (MW).

Barra	1997	1998	1999	2000	2001
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	650,0	667,0	700,0	715,0	735,0
6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
8	700,0	710,0	750,0	775,0	800,0
9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
11	229,0	238,0	250,0	260,0	270,0
12	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
13	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
14	368,0	375,3	410,0	417,0	430,0
15	139,0	150,0	170,0	187,7	210,0
16	262,0	272,3	280,0	290,5	300,0
17	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
18	427,0	427,0	430,0	441,0	450,0
19	310,0	321,8	350,0	358,5	370,0
20	46,0	46,0	50,0	87,0	100,0
21	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
22	424,0	451,0	480,0	495,0	530,0
23	126,0	131,0	140,0	151,0	160,0
24	279,0	284,5	310,0	317,8	340,0
25	117,0	117,0	120,0	135,0	150,0
26	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
27	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
28	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
29	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
31	612,0	720,0	820,0	827,0	850,0
32	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
33	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
34	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
35	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

6.3.1 - Planos de Expansão da Geração

Como no exemplo anterior, foram considerados para este exemplo, os 5 planos de geração mais baratos. Os custos descontados para 1997, referentes a esses planos, adotados como resultados preliminares do problema de planejamento, são mostrados na tabela 6.3.7, levando-se em conta os custos relativos somente aos equipamentos de geração e os custos globais estimados,

quando se considera os custos de integração das usinas, como percentagem dos seus custos de construção (10%).

Tabela 6.3.7 - Custos de expansão do sistema de geração.

Custos de Expansão - US\$		
Plano	Só Equipamentos de Geração	Geração + Transmissão Estimada
1	864.508.670,00	936.098.820,00
2	864.971.010,00	936.561.150,00
3	865.786.880,00	937.635.070,00
4	866.574.080,00	938.422.270,00
5	892.699.390,00	966.328.580,00

Utilizaram-se como parâmetros de controle para a obtenção dos planos de expansão da geração, cujos custos são mostrados acima, os seguintes valores:

- Número de iterações - 2
- Número máximo de configurações geradas na lista fechada - 15

Após a obtenção dos resultados iniciais em termos de planos de expansão do sistema de geração, utilizou-se o programa para expansão integrada, no sentido de se tentar obter uma redução de custos globais, pela consideração explícita da transmissão. Os resultados obtidos são mostrados a seguir:

6.3.2 - Determinação do Melhor Plano Integrado

Para este sistema, a garantia da determinação do melhor plano integrado, só é obtida para um valor de M igual a 0,1, para o qual são gerados pelo algoritmo final, os 5 planos integrados especificados em princípio. O

desempenho do algoritmo é mostrado na tabela 6.3.8 abaixo:

Tabela 6.3.8 - Desempenho do algoritmo final em função do Limitante Inferior de Custo de Transmissão.

M	Número de Planos Integrados Gerados Pelo Algoritmo	Melhor Plano Integrado	Tempo de CPU
0,1	5	Plano 3	39' 18''
0,2	4	Plano 3	38' 52''
0,3	4	Plano 3	38' 52''
0,4	4	Plano 3	38' 52''
0,5	4	Plano 3	38' 52''
0,6	4	Plano 3	38' 52''
0,7	3	Plano 3	20' 39''
0,8	3	Plano 3	20' 39''
0,9	3	Plano 3	20' 39''

Observa-se que para este sistema a escolha adequada do valor de M, tem influência direta sobre o esforço computacional necessário para a obtenção do melhor plano integrado. Utilizando a sua experiência e conhecimento do sistema, o planejador poderia optar por uma faixa de variação para M entre 0,7 e 0,9 e já conseguir obter o melhor plano.

Atribuíram-se os seguintes valores para os parâmetros de controle do processo de expansão do sistema de transmissão:

- Número de iterações - 5
- Número máximo de configurações geradas na lista fechada - 20

A tabela 6.3.9 mostra a convergência do processo de expansão da transmissão, via busca em grafo, para os 5 planos integrados obtidos, considerando-se o limite máximo de 5 iterações.

Tabela 6.3.9 - Custos de expansão do sistema de transmissão.

Plano	Custo de Expansão (US\$)	Iteração Em Que Foi Obtido
1	54.610.864,00	2
2	87.991.008,00	5
3	33.702.592,00	3
4	89.283.104,00	5
5	24.049.280,00	2

O programa de expansão integrada, forneceu 5 alternativas de expansão do sistema, sendo que os problemas de expansão dos sistemas de geração e transmissão, foram resolvidos de maneira otimizada. Os custos globais de expansão referentes a cada uma dessas alternativas de expansão, são mostrados na tabela 6.3.10 e a determinação do melhor plano integrado, feita pelo programa, considera o plano mais barato a partir da combinação das duas parcelas de custo (geração + transmissão).

Tabela 6.3.10 - Custos globais de expansão.

Plano	Custo (US\$)		
	Geração	Transmissão	Total
3	865.786.880,00	33.702.592,00	899.489.472,00
5	892.699.390,00	24.049.280,00	916.748.670,00
1	864.508.670,00	54.610.864,00	919.119.534,00
2	864.971.010,00	87.991.008,00	952.962.018,00
4	866.574.080,00	89.283.104,00	955.857.184,00

O plano 3, mostra-se como o melhor plano integrado de expansão, resultando em reduções de US\$ 36.609.348,00 em relação ao custo global com parcela de transmissão estimada, de US\$ 17.259.198,00 em relação ao segundo melhor plano integrado, obtido de maneira otimizada (plano 5) e de US\$ 19.630.062,00 em relação ao plano integrado 1.

Nota-se que os custos de expansão da geração e da transmissão,

referentes ao plano 3, não são os melhores individualmente.

São mostrados nas tabelas 6.3.11, 6.3.12 e 6.3.13, respectivamente, o melhor cronograma de obras do sistema de geração, o pré-despacho de geração das usinas e o cronograma de obras da rede de transmissão, associado ao melhor plano de geração.

Tabela 6.3.11 - Melhor cronograma de obras do sistema de geração.

Usina	N. Unidades Alocadas p/ Ano				
	1997	1998	1999	2000	2001
Usina 8	02	--	--	--	--
Usina 6	--	01	01	--	--
Usina 7	--	--	01	04	01
Usina 9	--	--	--	--	02
Acréscimo (MW)	300	250	300	200	250
Acréscimo (MWh)	210	135	167	127	158
Pot. Total (MW)	5000	5250	5550	5750	6000
En. Firme Total (MWh)	4090	4225	4392	4518	4677

Tabela 6.3.12 - Pré-despacho de geração referente ao melhor plano integrado (valores em p.u., na base 100 MVA).

Usina	1997	1998	1999	2000	2001
Usina 1	16,88	16,84	17,06	17,08	17,08
Usina 2	11,25	11,22	11,37	11,39	11,39
Usina 3	5,63	5,61	5,69	5,69	5,69
Usina 4	4,69	4,68	4,74	4,75	4,75
Usina 5	5,63	5,61	5,69	5,69	5,69
Usina 6	0,00	2,34	4,74	4,75	4,75
Usina 7	0,00	0,00	0,47	2,37	2,85
Usina 8	2,81	2,81	2,84	2,85	2,85

Tabela 6.3.13 - Melhor cronograma de obras do sistema de transmissão.

Linha	Ano de Construção
18 - 19	1997
6 - 28	1999
19 - 22	1999
18 - 19	1999
26 - 33	1999
33 - 34	2000
1 - 4	2000
18 - 35	2001

6.4 - Conclusão

O programa computacional utilizado, foi implementado com a finalidade de fornecer o melhor plano integrado de expansão de um sistema elétrico. Contudo, pode-se utilizá-lo para a obtenção de programas de expansão do sistema de geração, considerando-se custos estimados para a expansão da transmissão, caracterizando o planejamento desacoplado.

Quando o planejamento é realizado de maneira integrada, o programa fornece custos para a expansão da transmissão, que podem alterar a ordem de preferência dos planos de expansão do parque gerador, em relação a custos.

Os exemplos apresentados ilustram o fato descrito acima e reforçam a idéia de se seguir rumo à busca da obtenção de soluções otimizadas para o problema de planejamento. Contudo, ficará a critério do usuário da metodologia aqui proposta, o estabelecimento de valores para os parâmetros de controle do processo de planejamento integrado, podendo o mesmo abrir mão da otimalidade das soluções, em função dos recursos computacionais disponíveis.

A inclusão da Estabilidade Transitória, conforme já foi mostrado em [3,10], permite a consideração de um limite operativo que é dependente do ponto de operação do sistema, em condições normais, e que garante a manutenção do sincronismo entre geradores, na ocorrência de curto-circuito, seguido da retirada da linha.

CAPÍTULO VII

7 - CONCLUSÕES GERAIS E PROPOSTAS PARA FUTUROS TRABALHOS

7.1 - Conclusões Gerais

Este trabalho propôs-se a apresentar uma metodologia para a realização da expansão integrada dos sistemas de geração e transmissão de energia elétrica, através da consideração explícita dos custos de expansão da rede, na determinação de um cronograma de obras do parque gerador.

Foram apresentadas algumas razões que permitem pensar na utilização do planejamento integrado, como forma de se obter políticas otimizadas de expansão dos sistemas elétricos e em consequência, utilizar da maneira mais racional possível, os recursos técnicos e financeiros disponíveis, reduzindo o montante de investimentos necessários para a expansão.

A apresentação do problema de expansão, vista no capítulo 2, teve como principal objetivo, situar o trabalho dentro da área de Planejamento, explicitando-se os principais objetivos a serem alcançados. Obteve-se uma idéia geral dos procedimentos e informações necessárias para a solução do problema e da interdependência existente entre os estudos de expansão da geração e de transmissão.

A metodologia de busca de caminho de mínimo custo via grafo de expansão, se mostra bastante adequada para a expansão dos sistemas elétricos pois, os mesmos podem ser modelados por redes finitas e então, utilizam-se as

características deste modelo, no sentido de orientar as buscas das melhores alternativas de expansão. Dentro do grafo de expansão, estão representadas, através de caminhos, as diversas estratégias de construção de usinas geradoras e linhas de transmissão, sendo que o processo de busca permite a eliminação de estratégias indesejáveis, o que faz com que não se necessite analisar todos os caminhos possíveis dentro do grafo.

A partir da apresentação da metodologia empregada na obtenção de soluções otimizadas para o problema da expansão, procurou-se formular, dentro das definições vistas no capítulo 2, os problemas de expansão, via busca em grafos, dos sistemas de geração, que devido às suas características, apresenta formulação simples, e de transmissão, que se mostra mais complexo, devido basicamente às dimensões do problema (grande número de alternativas de reforço da rede) e ao estudo da Análise de Segurança, utilizando os critérios estático e dinâmico, sendo este último, baseado na análise de estabilidade transitória, utilizando o conceito da Superfície Limite de Energia Potencial - SLEP.

A metodologia proposta para a determinação do melhor Plano Integrado é simples, pois trata-se de um estudo de comparação econômica de alternativas. O Limitante Inferior de Custo de Transmissão, empregado no algoritmo final proposto, aparece como um parâmetro de controle do processo global de expansão, gerando estimativas iniciais para o custo de expansão da transmissão e agindo no sentido de acelerar a obtenção dos planos integrados de expansão.

Resultados satisfatórios podem ser obtidos, com a utilização de valores para este parâmetro, que levem em conta as variações que podem ocorrer

na prática, entre os custos de planos de expansão da transmissão, quando se altera a ordem de construção de usinas geradoras.

A hipótese sobre a significância dos custos relativos à expansão da rede, foi confirmada através dos resultados obtidos no capítulo 6, onde se observa que o primeiro plano de expansão do parque gerador, inicialmente estabelecido, deixa de ser o mais atrativo quando se insere a parcela de custos de expansão da transmissão. Obtém-se outro cronograma de obras como sendo o melhor, o que equivale à alteração na seqüência de construção das usinas.

O programa computacional desenvolvido, fornece o melhor plano integrado de expansão, mesmo que este plano não implique em alterações no cronograma de obras do parque gerador, além de permitir a realização do planejamento de forma desacoplada, desconsiderando a rede de transmissão, quando da escolha das melhores alternativas de reforço do parque gerador.

7.2 - Propostas Para Futuros Trabalhos

As sugestões aqui apresentadas, referem-se basicamente à expansão da rede de transmissão.

Inicialmente, admite-se a possibilidade de obtenção de resultados menos conservativos, a partir do estabelecimento de um critério para a proposição das alternativas de reforço da rede, considerando-se que outros ramos podem ser reforçados, além daqueles que se apresentem sobrecarregados. Este procedimento deverá aumentar as dimensões do grafo de busca, aumentando conseqüentemente os requisitos computacionais, problema que

pode ser contornado em função das características do algoritmo de busca em grafo utilizado.

Adicionalmente, propõe-se a consideração do reforço da rede e integração de novas usinas, através da construção de linhas de transmissão não existentes quando do início do processo de planejamento. Em outras palavras, isto consiste em se ampliar o conjunto de ramos da rede básica, pela adição dessas linhas que determinam novos caminhos para a transmissão de energia.

De acordo com o que foi exposto acima, propõe-se ainda a utilização de um critério mais eficiente de ordenação das configurações sucessoras, no passo 5 do algoritmo de busca, que não leve em conta unicamente os custos. Sugere-se um procedimento idêntico ao apresentado na subseção 4.7.1 para a expansão a curto prazo, porém com o cálculo aproximado para o critério de eficiência, conforme mostrado em [2].

Devido ao que foi comentado na subseção 2.3.1, propõe-se a utilização de uma rotina de redespacho de geração, inserida no algoritmo de expansão da transmissão, como forma de melhorar a segurança dinâmica do sistema, aumentando o limite de viabilidade das configurações, pela imposição de restrições operativas ao parque gerador. Tal procedimento levaria então, à postergação da construção de linhas e à conseqüente redução de custos de expansão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - TINNEY, W.F., "Compensation Methods for Network Solutions by Optimally Ordered Triangular Factorization". PICA Conference, Boston - 1971.
- [2] - GONZAGA, C.C., "Estudo de Algoritmos de Busca em Grafos e Sua Aplicação a Problemas de Planejamento". Tese de Doutorado - Engenharia Elétrica - UFRJ - 1973.
- [3] - COLVARA, L.D., "Planejamento do Sistema de Transmissão de Energia Elétrica com Aplicação de Critério de Estabilidade Transitória de Liapunov". Tese de Mestrado - Engenharia Elétrica - UFSC - 1981.
- [4] - FONSECA, L.G.S., SAVI, T.C.O. & MOROZOWSKI F^o, M., "Estabelecimento de Cenários de Expansão do Sistema Elétrico na Área de A tuação da Eletrosul - Volume 4 - Cenários de Redes de Transmissão". Centrais Elétricas do Sul do Brasil - ELETROSUL - 1984.
- [5] - FONSECA, L.G.S. & DECKER, I.C., " Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas de Potência Pela Monitoração das Trajetórias Aproximadas Após Perturbação". I Congresso Latino-Americano de Automática e V Congresso Brasileiro de Automática, Campina Grande - 1984.

- [6] - DECKER, I.C., "Análise de Estabilidade Transitória em Sistemas de Potência Usando o Conceito de Superfície Limite de Energia Potencial". Tese de Mestrado - Engenharia Elétrica - UFSC - 1984.
- [7] - EL-ABIAD, A.H., "Power Systems Analysis and Planning". Hemisphere Publishing Corporation - 1983.
- [8]- RAMOS,D.S., MOROZOWSKI F.^o, M. & PEREIRA, M.V.F., "Integração do Planejamento da Expansão do Parque Gerador e Sistema de Transmissão Interligado Brasileiro - Aspectos Conceituais e Metodológicos". X Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE. Curitiba - 1989.
- [9] - CAMPOS FILHO, P., "Uma Metodologia Para a Solução do Problema de Alocação Sequencial de Recursos". Tese de Mestrado - Engenharia de Produção - UFSC - 1987.
- [10] - MANO, A.M., "Planejamento a Longo Prazo da Expansão de Sistemas de Transmissão de Energia Elétrica com Restrição de Estabilidade Transitória Utilizando o Conceito de Superfície Limite de Energia Potencial". Tese de Mestrado - Engenharia Elétrica - UFSC -1988.
- [11] - ELETROBRÁS, "Plano Nacional de Energia Elétrica 1987/2010". Rio de Janeiro - 1987.

- [12] - DECKER, I.C., "Determinação de Tempos Críticos de Eliminação de Defeito em Estudos de Estabilidade Transitória em Sistemas de Potência - Manual de Utilização do Programa SLEP". UFSC - 1984.
- [13] - PAI, M.A., "Power System Stability". North-Holland Publishing Company, 1981.
- [14] - ATHAY, T., SHERKET, V.R., PODMORE, R., VIRMANI, S. & PUECH, C., "Transient Energy Stability Analysis". Conference on Systems Engineering for Power. Devos, Switzerland. Also U.S. Department of Energy, publication n.^o Conf - 790904 - PL 1980.
- [15] - FONSECA, L.G.S. & LÚCIO, J.C.M., "Planejamento da Expansão do Sistema de Geração Considerando Redes de Transmissão". VIII Congresso Brasileiro de Automática. Belém - 1990.
- [16] - FONSECA, L.G.S., DECKER, I.C. & PEDROSO, A.S., "Métodos de Análise de Estabilidade Transitória - Estudo Comparativo". VIII Congresso Brasileiro de Automática. Belém - 1990.
- [17] - GCPS, CTST, GTCP. "Diretrizes Para a Consideração do Sistema de Geração em Estudos de Planejamento do Sistema de Transmissão". Documento Interno - Centrais Elétricas do Sul do Brasil - ELETROSUL - 1989.

- [18] - MONTICELLI, A., "Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica". -
Centro de Pesquisas de Energia Elétrica - CEPEL /
Centrais Elétricas Brasileiras - ELETROBRÁS.

APÊNDICE A - CONJUNTO INVARIANTE

A.1 - Conjunto Invariante

Um Conjunto Invariante para o sistema de equações:

$$\dot{\underline{X}} = f(\underline{X})$$

(A.1.1)

$$\underline{X}(0) = \underline{X}_0,$$

é definido como um subconjunto do espaço de estado tal que uma trajetória que começa para $t = t_0$ em Ω , pertence a Ω para todo $t \geq t_0$ [6].

O estado de equilíbrio \underline{X}_e , bem como qualquer trajetória de $\dot{\underline{X}} = f(\underline{X})$, constituem um Conjunto Invariante.

Teorema A.1.1:

Seja Ω um Conjunto Invariante para o sistema A.1.1. Considere $\underline{X}_e \in \Omega$ e $V(\underline{X} - \underline{X}_e)$ definida positiva em Ω com $V(0) = 0$. Seja $S(k)$ o conjunto:

$$S(k) = \{\underline{X} \in \Omega \mid V(\underline{X} - \underline{X}_e) < k\}$$

Supõe-se para algum $k_0 > 0$, que:

a) $V(\underline{X} - \underline{X}_e)$ é definida positiva e crescente em $S(k_0)$.

b) $V(\underline{X} - \underline{X}_e)$ é definida negativa em $S(k_0)$.

Então $S(k_0)$ está contido na região de atração de \underline{X}_e [14].

Pode-se interpretar este teorema, observando-se a figura A.1.1, com estado de equilíbrio pré e pós-falta coincidentes. Considerando-se a trajetória de estado sob falta e sendo t_{cr} o tempo crítico de retirada da falta, tem-se:

- Para $t < t_{cr}$, todas as trajetórias assinaladas por S_1, S_2, \dots, S_n , do sistema pós-falta convergem para \underline{X}_e quando $t \rightarrow \infty$. Estas trajetórias mais o ponto de equilíbrio, constituem o subconjunto do Conjunto Invariante Ω , $V(\underline{X} - \underline{X}_e)$ é definida positiva e $\dot{V}(\underline{X} - \underline{X}_e)$ é definida negativa.

- Para $t > t_{cr}$, todas as trajetórias pós-falta assinaladas por u_1, u_2 , divergem e $V(\underline{X} - \underline{X}_e)$ é definida negativa, consequentemente, para este subconjunto do Conjunto Invariante, a função de Liapunov não é válida.

- Para $t = t_{cr}$, a trajetória sob falta, especifica uma separatriz para as trajetórias estáveis e instáveis, em função de uma dada contingência.

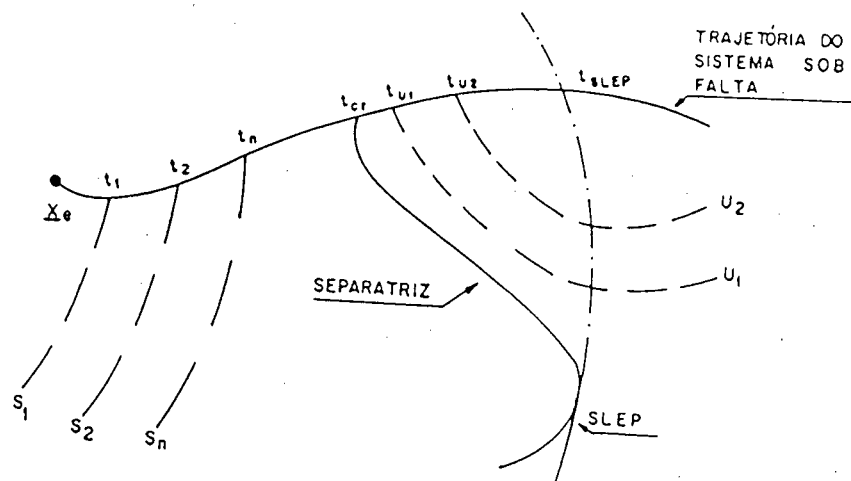


Figura A.1.1 - Trajetórias de estado em função do tempo de eliminação da falta.

APÊNDICE B - DETERMINAÇÃO DA VIABILIDADE DE UMA CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO

B.1 - Algoritmo Para a Determinação do Limite de Viabilidade de Uma Configuração

Passo 0: Obter a configuração sucessora a ser analisada.

Passo 1: Determinar o ponto de equilíbrio do sistema pré-falta via fluxo de potência DC.

Inicializar contador de contingências, $i = 0$.

Passo 2: Iniciar análise de contingência, $i = i + 1$

Retirar a linha de maior capacidade do ramo i .

Modificar a matriz Y_{barra} .

Passo 3: Determinar o ponto de equilíbrio do sistema pós-falta, θ^e .

Passo 4: Verificar se há linhas ou transformadores em que o limite de fluxo de potência ativa (limite térmico) foi ultrapassado. Se isto ocorrer, anotar a(s) sobrecarga(s) e ir ao passo 11.

Passo 5: Verificar defasagens nos ramos. Se nenhuma excede a ϕ_{max} (seletor de casos para a análise de estabilidade transitória), ir ao passo 11.

Passo 6: Se a falta for do tipo curto-circuito trifásico com chaveamento de linha, ir ao passo 7. Se for somente saída de operação de

linha ou transformador, ir ao passo 8.

Passo 7: Calcular a trajetória sob falta até $g^T(\theta) \cdot (\theta - \theta^e) = 0$ para algum θ_1^* ou até se atingir o tempo de abertura do disjuntor (t_{ad}), com o chaveamento da linha.

Se θ_1^* for encontrado, ir ao passo 9.

Senão, ir ao passo 8.

Passo 8: Calcular a trajetória pós-falta a partir de t_0 ou t_{ad} (falta tipo curto-circuito), até $g^T(\theta) \cdot (\theta - \theta^e) = 0$ para algum θ_2^* ou até um tempo máximo de simulação (t_{max}) no caso estável.

Se θ_2^* for encontrado, ir ao passo 9.

Senão, ir ao passo 10.

Passo 9: O sistema é considerado instável para esta contingência. A linha que saiu de operação é considerada sobrecarregada e anotada.

Ir ao passo 11.

Passo 10: O sistema é considerado estável para esta contingência.

Passo 11: Recuperar a matriz Y_{barra} , recolocando a linha retirada do ramo i .

Se $i \leq m$, ir ao passo 2.

Senão, retornar ao algoritmo de expansão.

Caso a SLEP não seja cruzada em nenhuma das contingências analisadas, passa-se ao próximo estágio, repetindo-se o procedimento até se detectar sobrecarga ou se atingir o horizonte de planejamento.

Após terem sido analisadas todas as contingências, tem-se o limite de viabilidade da configuração em estudo, máxima demanda atendida sem violar critérios de segurança e, em caso de sobrecargas, as linhas sobrecarregadas candidatas a um eventual reforço.

B.2 - Cálculo das Trajetórias de Estado do Sistema

A monitoração da trajetória dos ângulos dos diversos geradores, exige a resolução das equações diferenciais do sistema durante e após a falta. A utilização de métodos convencionais de integração, requer grande esforço computacional, o que se torna indesejável [6].

Deste modo, emprega-se a expansão em Série de Taylor, considerando-se que a função Energia Potencial se mostra pouco sensível a pequenas variações nas trajetórias de estado. O sistema de equações diferenciais transforma-se em um sistema de equações algébricas recursivas, truncando-se a série mostrada abaixo, no termo relativo à quarta derivada dos ângulos dos geradores.

$$\begin{aligned}\theta_1(t) &= \theta_1(t_0) + \theta_1^{(1)}(t_0) \frac{(t-t_0)}{1!} + \theta_1^{(2)}(t_0) \frac{(t-t_0)^2}{2!} + \dots \\ \omega_1(t) &= \theta_1^{(1)}(t_0) + \theta_1^{(2)}(t_0) \frac{(t-t_0)}{1!} + \theta_1^{(3)}(t_0) \frac{(t-t_0)^2}{2!} + \dots\end{aligned}\tag{B.2.1}$$

As expressões para o cálculo dos coeficientes de B.2.1, são mostradas a seguir para a expansão realizada em torno do ponto de equilíbrio pré-falta e em torno de um ponto qualquer ao longo da trajetória.

B.2.1 - Expansão em Torno do Ponto de Equilíbrio Pré-Falta

No ponto de equilíbrio pré-falta, o desvio de velocidade é nulo. Assim, considerando-se amortecimento uniforme, tem-se:

$$\theta_i = \theta^e$$

$$\theta_i^{(1)} = \omega_i = 0$$

(B.2.2)

$$\theta_i^{(2)} = \omega_i^{(1)} = \frac{P_{m_i} - P_{g_i}(\theta)}{M_i} - \frac{1}{M_T} \sum_{j=1}^{n_g} \left[P_{m_j} - P_{g_j}(\theta) \right]$$

$$\theta_i^{(3)} = \omega_i^{(2)} = -\lambda \cdot \theta_i^{(2)}$$

$$\theta_i^{(4)} = \omega_i^{(3)} = -\lambda \cdot \theta_i^{(3)} - \frac{P_{g_j}^{(2)}(\theta)}{M_i} + \frac{1}{M_T} \sum_{j=1}^{n_g} P_{g_j}^{(2)}(\theta),$$

(i = 1, 2, ..., n_g)

$$\text{onde: } P_{g_i} = \sum_{\substack{j=1 \\ \neq i}}^{n_g} \left[C_{ij} \text{ Sen } \theta_{ij} + D_{ij} \text{ Cos } \theta_{ij} \right]$$

$$P_{g_i}^{(1)} = 0$$

(B.2.3)

$$P_{g_i}^{(2)} = \sum_{\substack{j=1 \\ \neq i}}^{n_g} \left\{ C_{ij} \text{ Cos } \theta_{ij} [\theta_i^{(2)} - \theta_j^{(2)}] - D_{ij} \text{ Sen } \theta_{ij} [\theta_i^{(2)} - \theta_j^{(2)}] \right\}$$

(i = 1, 2, ..., n_g)

B.2.2 - Expansão em Torno de um Ponto Qualquer ao Longo da Trajetória

O desvio de velocidade, neste caso, é diferente de zero e as equações para a obtenção dos coeficientes, considerando-se amortecimento uniforme, ficam da seguinte forma:

$$\begin{aligned}\theta_i^{(1)} &= \omega_i \\ \theta_i^{(2)} &= \omega_i^{(1)} = -\lambda \cdot \theta_i^{(1)} + \frac{P_{m_i} - P_{g_i}(\theta)}{M_i} - \frac{1}{M_T} \sum_{j=1}^{n_g} \left[P_{m_j} - P_{g_j}(\theta) \right] \\ \theta_i^{(3)} &= \omega_i^{(2)} = -\lambda \cdot \theta_i^{(2)} - \frac{P_{g_j}^{(1)}(\theta)}{M_i} + \frac{1}{M_T} \sum_{j=1}^{n_g} P_{g_j}^{(1)}(\theta),\end{aligned}\tag{B.2.4}$$

(i = 1, 2, ..., n_g)

A potência elétrica P_{g_i} é obtida também por B.2.3 e sua primeira derivada é calculada como abaixo:

$$P_{g_i}^{(1)} = \sum_{\substack{j=1 \\ \neq i}}^{n_g} \left\{ C_{ij} \cos \theta_{ij} [\theta_i^{(1)} - \theta_j^{(1)}] - D_{ij} \sin \theta_{ij} [\theta_i^{(1)} - \theta_j^{(1)}] \right\}\tag{B.2.5}$$

(i = 1, 2, ..., n_g)

Para ambos os casos, tem-se ainda:

$$\lambda = \frac{d_i}{M_i}, \quad (i = 1, 2, \dots, n_g)$$

$$C_{ij} = |E_i| \cdot |E_j| \cdot B_{ij}\tag{B.2.6}$$

$$D_{ij} = |E_i| \cdot |E_j| \cdot G_{ij},$$

onde: E_i é a tensão na barra interna na i-ésima barra de geração;

G_{ij} é a condutância de transferência entre as barras internas do i-ésimo e do j-ésimo gerador;

B_{ij} é a susceptância de transferência entre as barras internas do i-ésimo e do j-ésimo gerador.